

**Área de Conocimiento de Tecnología de la
Información y Comunicación**

**Propuesta de modelo inteligente
de evaluación de idoneidad de
cultivos utilizando SIG y
algoritmos de inteligencia
artificial en la toma de decisiones
de planificación agrícola en
Nicaragua**

**Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero de Sistemas**

Elaborado por:

Br. Ulises Antonio
López Benavides
Carnet 2017-0297U

Br. Eveling Jelixia
Miranda Lira
Carnet: 2017-0730U

Br. Kevin Josué
Torrez Mendoza
Carnet: 2017-1091U

Tutor:

PhD. Denis
Eduardo
Hernández García

23 de abril de 2026
Managua, Nicaragua

Managua, 20 de abril del 2026

Msc. Claudia Lucía Benavidez Rugama

Directora de Área de Conocimiento de
Tecnología de la Información y
Comunicación

Universidad Nacional de Ingeniería

Distinguida Msc Benavidez.

Mediante la presente hago constar que he revisado en calidad de tutor el proyecto de graduación como forma de culminación de estudios con título **Propuesta de un Modelo inteligente de evaluación de idoneidad de cultivos utilizando SIG y algoritmos de inteligencia artificial en la toma de decisiones de planificación agrícola en Nicaragua**, realizada por los Bachilleres Ulises Antonio López Benavides, Eveling Jelixia Miranda Lira y Kevin Josué Tórrez Mendoza, la cual cumple con los requisitos solicitados por la Universidad Nacional de Ingeniería para trabajos monográficos como forma de culminación de Estudios de la carrera de Ingeniería de Sistemas, de igual manera he revisado que se incluyan las recomendaciones realizadas por el jurado el día de la predefensa.

Por lo anterior doy mi autorización para que se proceda a la defensa de la misma por parte de los alumnos. Sin más a que realizar mención, me despido deseándole éxito en sus funciones.

Atentamente,

Phd. Denis Eduardo Hernández García

Tutor de Proyecto de graduación
Profesor titular del Área de
Conocimiento de Tecnología de la



Dirección de Área de
Conocimiento de Tecnología
de la Información y Comunicación

Managua, 26 de enero 2026

Br. Ulises Antonio López Benavides 2017-0297U

Br. Kevin Josué Tórrez Mendoza 2017-1097U

Br. Eveling Jelixia Miranda Lira 2017-0730U

Egresados Programa académico Ingeniería de Sistemas
Sus manos.-

Estimados Egresados:

Reciban cordiales saludos y éxito en sus actividades.

Por medio de la presente, les comunico la aprobación del trabajo monográfico titulado: "Propuesta de modelo inteligente de evaluación de idoneidad de cultivos utilizando SIG y algoritmos de inteligencia artificial en la toma de decisiones de planificación agrícola en Nicaragua", el cual cumple con los requisitos establecidos en el capítulo II de la normativa de trabajos monográficos de la UNI como forma de culminación de estudios, por lo que queda oficialmente aprobado por esta Dirección.

El docente responsable de acompañarle en el proceso de desarrollo de su tema monográfico es el PhD. Denis Eduardo Hernández García.

A partir de la fecha de aprobación, tienen como máximo seis meses para realizar el trabajo monográfico incluyendo la defensa.

Atentamente,


MSc. Claudia Lucía Benavidez Rugama
Directora Área de Conocimiento de
Tecnología de la Información y Comunicación



Cc. PhD. Denis Eduardo Hernández García – Tutor
MSc. Luisa Massiel Mercado Gutiérrez - Secretaria Académica.
Archivo DACTIC.



Móvil: (505) 8889 0903



Recinto Universitario Simón Bolívar
Avenida Universitaria,
Managua, Nicaragua.
Apdo: 5595



claudia.benavidez@dactic.uni.edu.ni-
www.uni.edu.ni

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo, en primer lugar, a Dios, por ser el autor, guía de nuestro camino, por sostenernos en los momentos de duda y cansancio, por permitirnos comprender que este logro no es únicamente el resultado del esfuerzo humano, sino del propósito que Él ha trazado en nuestras vidas. Cada paso recorrido, cada aprendizaje y cada obstáculo superado fueron parte de su voluntad y de su tiempo perfecto.

De manera especial, a nuestros padres, por ser el reflejo del amor, la paciencia y la perseverancia. Su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su sacrificio constante fueron el fundamento que hizo posible alcanzar esta meta, aun cuando el camino parecía largo y desafiante.

A nuestra familia y amigos, por su acompañamiento constante, comprensión y apoyo incondicional. Sus palabras de ánimo, paciencia y confianza fueron un pilar fundamental para mantenernos firmes y culminar con éxito este proceso académico.

A nuestro tutor, Phd. Denis Eduardo Hernández, por su orientación académica, compromiso y acompañamiento permanente durante el desarrollo de esta investigación, por sus valiosos aportes, disposición y conocimientos compartidos, que enriquecieron significativamente este proceso formativo.

Finalmente, dedicamos este estudio a los productores agrícolas, técnicos y profesionales del sector agropecuario, y a la sociedad nicaragüense, con la convicción de que el conocimiento, la tecnología y la planificación responsable pueden contribuir al desarrollo sostenible del país.

“Encomienda a Jehová tu camino, confía en Él, y Él hará.”

(Salmo 37:5)

RESUMEN

La agricultura en Nicaragua representa un pilar fundamental para la economía y la seguridad alimentaria, pero actualmente enfrenta retos significativos debido a la variabilidad climática y a la dependencia de prácticas basadas en el conocimiento empírico tradicional. Ante esta situación, la presente investigación propone el desarrollo de un modelo inteligente que integra Sistemas de Información Geográfica (SIG) y algoritmos de inteligencia artificial para evaluar la idoneidad agrícola en el territorio nacional. El objetivo central es transformar la toma de decisiones, pasando de un enfoque basado en la tradición a uno fundamentado en el análisis técnico de variables edafoclimáticas críticas, permitiendo identificar con precisión qué zonas poseen las condiciones óptimas para cultivos, como ejemplo de demostración de este modelo se usaron los cultivos maíz NB6 y frijol INTA Rojo que se encuentra en Anexos, como parte de que este modelo puede adaptarse a los cultivos.

El proceso metodológico comenzó con una caracterización detallada de las propiedades del suelo nicaragüense y sus zonas climáticas, analizando factores como la textura, profundidad, pH, materia orgánica, temperatura y precipitación. Estos datos fueron procesados mediante herramientas geoespaciales como QGIS, permitiendo estandarizar los requerimientos biológicos del cultivo bajo el Marco de Evaluación de Tierras (FLE) de la FAO. Esta estandarización es vital, ya que define los rangos de tolerancia de las plantas y establece las condiciones en las que el estrés de cultivo es mínimo, maximizando así el rendimiento productivo potencial.

El núcleo del proyecto es la implementación de un modelo de evaluación multicriterio que asigna pesos específicos a cada variable según su importancia relativa junto con los modelos inteligentes que permitieron la identificación de la criticidad de las variables para el desarrollo de un cultivo; por ejemplo, la materia orgánica del suelo se identificó como uno de los factores con mayor peso dentro de la productividad del cultivo maíz. El modelo también incorpora condiciones limitantes absolutas, como la toxicidad por pH o la falta de profundidad efectiva del suelo, las cuales actúan como restricciones que invalidan la idoneidad si se superan ciertos umbrales. Este enfoque

híbrido asegura que el resultado no sea solo una predicción teórica, sino una herramienta práctica para la planificación territorial.

Finalmente, el estudio concluye que la digitalización y el uso de modelos inteligentes son esenciales para una agricultura sostenible y resiliente en Nicaragua. Se recomienda que este prototipo se escale a otros cultivos y se fortalezca integrando variables socioeconómicas y filtros de zonificación que protejan áreas de reserva o zonas urbanas. Al proporcionar una base técnica sólida para instituciones públicas y productores privados, este modelo no solo busca mejorar la rentabilidad del sector, sino también garantizar el uso responsable de los recursos naturales del país frente a los desafíos del futuro.

Índice

1.	Introducción	1
2.	Antecedentes	2
3.	Situación problemática	3
4.	Objetivos	4
4.1.	General.....	4
4.2.	Específicos.....	4
5.	Justificación	5
6.	Marco Teórico	6
6.1.	Clima	6
6.2.	Estrés de Cultivo	7
6.3.	Idoneidad Agrícola	8
6.4.	Edafología	8
6.5.	Métodos tradicionales vs. enfoques computacionales	9
6.6	Sistemas de Información.....	10
6.7	Modelos de idoneidad agrícola y Superposición ponderada	11
6.8	Modelo multicriterio y SIG	14
6.9	Integración de Modelos Inteligentes en la planificación agrícola.....	15
7.	Metodología del Trabajo Monográfico	17
Fase 1:	Adquisición de Datos y Caracterización Edafoclimática	18
Fase 2:	Definición de Requerimientos de Cultivo y Estandarización (Marco FAO).....	19
Fase 3:	Desarrollo del Modelo Inteligente	19
8.	Desarrollo del Trabajo Monográfico	21
8.1	Sección 1. Adquisición de datos y Caracterización edafoclimática	22
Parte 1:	Investigación de las propiedades del suelo de Nicaragua	24
1.	Textura del suelo	24
2.	Profundidad del suelo	25
3.	pH del suelo	25
4.	Materia orgánica	27
5.	Pendiente	28
6.	Capacidad de retención del agua	28
7.	Drenaje	29
Parte 2.	Investigación de las zonas climáticas que conforman el territorio de Nicaragua	29

1. Temperatura.....	30
2. Precipitación.....	31
3. Radiación solar	31
4. Elevación	32
5. Humedad relativa	32
Parte 3. Clasificación de las zonas climáticas y edafológicas de Nicaragua	33
1. Zonas Climáticas.....	33
2. Zonas Edafológicas	40
8.2. Sección 2. Definición de Requerimientos de Cultivos y Estandarización (Marco FAO)	46
Parte 1: Identificar los principales cultivos de Nicaragua y seleccionar el cultivo específico para el análisis	46
Parte 2: Investigar las variedades del cultivo seleccionado y seleccionar la variedad a estudiar .	47
Parte 3: Investigar los requerimientos climáticos y edafológicos de la variedad seleccionada	48
Parte 4: Clasificar las variables (clima, suelo) según FLE para la variable del cultivo	49
8.3. Sección 3. Desarrollo del Modelo Inteligente	54
Parte 1: Aplicación del método evaluación multicriterio de las clasificaciones de FLE	54
1. PH Del Suelo.....	55
2. Materia Orgánica	56
3. Pendiente.....	57
4. Profundidad efectiva.....	58
5. Temperatura Media Diaria	59
6. Precipitación por ciclo productivo total.....	60
7. Humedad Relativa.....	61
8. Elevación	62
9. Capacidad de Retención	63
10. Drenaje.....	64
11. Textura Del Suelo	65
12. Radiación Solar	65
Parte 2: Evaluar las variables críticas utilizando algoritmos inteligentes	66
Parte 3: Desarrollar el modelo de idoneidad de cultivos.....	71
1. Normalización de las variables	71
2. Concepto de criticidad	72
3. Idoneidad Máxima Teórica	72

4.	Condiciones limitantes.....	73
9.	Conclusiones.....	74
10.	Recomendaciones	75
11.	Referencias Bibliográficas	76
12.	Anexos.....	79

1. Introducción

La agricultura en Nicaragua es un sector fundamental para la economía y la seguridad alimentaria del país, además de ser una importante fuente de empleo. No obstante, enfrenta desafíos significativos derivados del cambio climático, que ha afectado su productividad y estabilidad. Según el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional, diversos municipios pueden ganar o perder aptitud agrícola según el cultivo, debido a la variabilidad climática y a la limitada disponibilidad de tecnología y herramientas técnicas que orienten una adecuada planificación territorial. En este contexto, las tecnologías geoespaciales, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), combinadas con modelos computacionales, se han consolidado como herramientas clave para la planificación agrícola, al permitir análisis precisos sobre la idoneidad territorial. Esto evidencia una oportunidad para desarrollar soluciones geoespaciales y computacionales que fortalezcan la toma de decisiones agronómicas y optimicen el uso del suelo según la idoneidad de los cultivos.

El presente documento propone un modelo inteligente para la evaluación de idoneidad de cultivos en Nicaragua, integrando técnicas de Sistemas de Información Geográfica y algoritmos de Inteligencia Artificial con el fin de optimizar la planificación agrícola y promover la sostenibilidad productiva. Su objetivo principal es fortalecer la toma de decisiones mediante el uso de información espacial y análisis técnico especializado, contribuyendo así a una gestión más eficiente del territorio agrícola.

El documento se organiza de la siguiente manera: En primer lugar, se caracterizan de manera edafológica y climática los suelos y condiciones climáticas de Nicaragua, . En segundo lugar, se describen y estandarizan los requerimientos edafológicos y climáticos del cultivo y la variedad seleccionada, de acuerdo con el marco metodológico de la FAO. Finalmente, se desarrolla un modelo inteligente que permite evaluar la idoneidad de cultivos mediante análisis multicriterio, contribuyendo a la optimización de la planificación agrícola en el territorio nacional.

2. Antecedentes

Los proyectos de idoneidad de cultivos en Nicaragua se han desarrollado con mayor frecuencia en el territorio nacional a razón de las problemáticas que enfrenta el sector. Como parte de iniciativas institucionales (INTA y MAG), así como de proyectos de cooperación internacional (FAO, CATIE y CIAT), se han desarrollado diferentes herramientas y estudios que anteceden a un sistema de idoneidad de cultivos para todo el territorio nicaragüense.

En los años 90 se realizaron estudios agroecológicos en la región con fuerte documentación técnica, estudios mediante los cuales se puede identificar el potencial agronómico y de producción de distintas zonas del país. Estos documentos representaron una base importante para comprender las características edafoclimáticas de las regiones agrícolas.

Más recientemente, el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) ha elaborado mapas interactivos de la producción y del estado de la fertilidad de los suelos. Según el INTA: “Los mapas interactivos permiten a productores, profesores, estudiantes, profesionales, técnicos, inversionistas y familias en general conocer la producción, el área sembrada de los cultivos, y la fertilidad de suelos por departamentos y municipios, en los rubros de granos básicos, café, cacao, plátano, hortalizas y otros”. Estos estudios y sistemas computacionales, si bien muestran información valiosa, no detallan las zonas de mejor idoneidad. En su lugar, presentan valores agronómicos dispersos que requieren conocimiento técnico para desarrollar un criterio claro sobre la aptitud del suelo y del sitio para la plantación de cultivos seleccionados.

Igualmente, la documentación técnica en forma de estudios especializados ha abordado aspectos como la zonificación agroecológica, el análisis de uso y cobertura del suelo, así como evaluaciones climáticas para cultivos específicos. Sin embargo, estos esfuerzos se han desarrollado de forma aislada o con cobertura limitada, lo que evidencia la necesidad de un sistema integral de análisis de idoneidad que unifique y actualice esta información.

3. Situación problemática

En el contexto agrícola, la toma de decisiones relacionadas con el uso del suelo continúa siendo un desafío para los productores, quienes en muchos casos basan sus prácticas productivas en la tradición, el conocimiento empírico o la experiencia acumulada, sin contar con un análisis integral de las condiciones edafológicas y climáticas del territorio. Esta situación limita la incorporación de información técnica sobre variables determinantes como las propiedades del suelo, la temperatura, la precipitación, la elevación y otros factores ambientales que influyen directamente en el desempeño productivo de los cultivos.

La ausencia de evaluaciones sistemáticas de idoneidad agrícola conlleva a un uso ineficiente del territorio, reflejado en bajos rendimientos, degradación progresiva de la fertilidad del suelo y afectaciones a los ecosistemas. Asimismo, la falta de información confiable sobre el potencial real de los terrenos impide la diversificación productiva y reduce la capacidad de adaptación de los sistemas agrícolas frente a la variabilidad climática, obligando a los productores a depender de un número limitado de cultivos y desaprovechando oportunidades productivas asociadas a los cambios estacionales.

Si bien los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen herramientas avanzadas para el análisis de variables ambientales y climáticas, en Nicaragua no se utilizan de forma sistemática modelos computacionales integrados para la evaluación de la idoneidad agrícola del sitio. La ausencia de este tipo de modelos limita la identificación de áreas con mayor potencial productivo y obliga a que las decisiones sobre el uso del territorio se realicen sin un respaldo técnico suficiente, afectando la planificación agrícola, el aprovechamiento eficiente y sostenible de los recursos naturales.

4. Objetivos

4.1. General

Proponer un modelo inteligente que permita la evaluación de idoneidad de cultivos en Nicaragua, integrando técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y algoritmos de Inteligencia Artificial que optimicen la toma de decisiones en la planificación agrícola y promuevan la sostenibilidad productiva.

4.2. Específicos

- Caracterizar de manera edafológica y climática los suelos y condiciones climáticas de Nicaragua, identificando sus principales propiedades, variabilidad espacial y potencial de uso en actividades productivas mediante el uso de SIG.
- Describir los requerimientos edafológicos y climáticos del cultivo seleccionado y su variedad específica en Nicaragua.
- Desarrollar un modelo inteligente que permita la evaluación de idoneidad de cultivos mediante el análisis de multicriterio ayudando a la optimización de toma de decisiones en la planificación agrícola.

5. Justificación

La evaluación de la idoneidad agrícola constituye un elemento fundamental para la planificación del desarrollo agrícola a escala nacional, ya que permite orientar el uso óptimo del territorio de acuerdo con las condiciones edafológicas y climáticas, favoreciendo sistemas productivos más eficientes, sostenibles y resilientes. En el contexto de Nicaragua, donde la agricultura cumple un rol estratégico en la economía nacional y en la seguridad alimentaria, tal como lo señalan informes del INTA. El presente estudio propone el desarrollo de un prototipo de modelo inteligente de idoneidad agrícola, concebido como una herramienta metodológica y tecnológica susceptible de ser mejorada, adaptada, escalada a otros cultivos. Este modelo integra Sistemas de Información Geográfica, el Marco de Evaluación de Tierras de la FAO y algoritmos de Inteligencia Artificial, demostrando el potencial de estas tecnologías para fortalecer los procesos de planificación agrícola nacional.

Desde la perspectiva del sector público, el modelo representa un insumo técnico para instituciones vinculadas a la planificación territorial, el desarrollo rural y la gestión agrícola, al facilitar la identificación de zonas con mayor aptitud productiva y apoyar la formulación de políticas y estrategias agrícolas. Para el sector privado, el prototipo constituye una herramienta de apoyo en la toma de decisiones relacionadas con la inversión, la selección de áreas productivas y la optimización del uso de la tierra.

Asimismo, los resultados generados benefician directamente a los técnicos y extensionistas agrícolas, quienes pueden utilizar la información como base para el desarrollo de un software que evalúe la idoneidad del todo el territorio nicaragüense, procesos de capacitación, asistencia técnica, transferencia de conocimiento. De igual manera, los agricultores se ven favorecidos al disponer de información clara y confiable que les permita reducir la incertidumbre productiva y mejorar sus decisiones de manejo. Finalmente, el impacto del estudio se extiende a la sociedad en general, al contribuir a una agricultura más eficiente y sostenible, fortaleciendo la seguridad alimentaria y el aprovechamiento responsable de los recursos naturales del país.

6. Marco Teórico

Los sistemas de idoneidad de cultivos basados en SIG¹ y técnicas computacionales se sustentan en fundamentos técnicos, científicos y contextuales para abordarlos de manera clara y objetiva. Las siguientes referencias ayudarán a mejorar la comprensión del lector sobre el tema en cuestión y cómo se utilizan los diferentes conceptos en el desarrollo del trabajo, por lo cual, es fundamental detallar cada concepto que intervendrá a lo largo de la investigación.

A continuación, se analizan y describen los conceptos más importantes necesarios para la realización de este trabajo:

6.1. Clima

El clima constituye el marco físico que condiciona el desarrollo de los sistemas agrícolas, por lo que su definición y caracterización son fundamentales para la evaluación de aptitud de cultivos. En esta investigación se adopta la definición de Hann (1902), quien señala que “el clima es el conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmosfera en un punto cualquiera de la Tierra”. En este contexto, el clima se considera un supra sistema que complementa la idoneidad agrícola, ya que sus variables definen las condiciones ambientales bajo las cuales los cultivos pueden desarrollarse y alcanzar niveles óptimos de rendimiento.

- **Clasificación climática de Nicaragua**

Tabla 1

Variables Climáticas Relevantes para Evaluación de Idoneidad Agrícola

Variable	Definición
Temperatura	Es la medida del calor ambiental. Afecta el crecimiento, floración, maduración y rendimiento del cultivo. Cada especie tiene un rango óptimo.
Precipitación	Es la cantidad de agua que cae en forma de lluvia en una región durante un período determinado. Determina la disponibilidad hídrica natural.

¹ SIG: Sistema de Información Geográfica

Radiación solar	Energía que proviene del sol y llega a la superficie terrestre. Es esencial para la fotosíntesis y acumulación de biomasa.
Elevación	Elevación del terreno sobre el nivel del mar. Afecta indirectamente el clima (temperatura, humedad, etc.) y define zonas agroecológicas.
Humedad relativa	Porcentaje de vapor de agua en el aire respecto al máximo posible. Influye en la transpiración y en enfermedades fúngicas.

Nota. Elaboración propia. Datos adaptados (FAO, Agroecological Zoning Guidelines, 1996)

Nicaragua, por su posición geográfica en Centroamérica y su variado relieve, presenta un clima predominantemente tropical con diferencias regionales significativas. La vertiente del Pacífico y la franja central se caracterizan por un régimen de clima tropical seco-estacional, con estaciones secas marcadas, mientras que la vertiente Atlántica (Caribe) presenta condiciones más húmedas y precipitaciones distribuidas a lo largo del año. Las zonas montañosas, debido a la elevación, presentan características de clima más templado. Estos patrones climáticos han sido documentados en los inventarios nacionales y en informes institucionales, como la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Nicaragua (INETER², 2018)

6.2. Estrés de Cultivo

Levitt (1980) define el estrés de cultivo como “cualquier factor ambiental potencialmente desfavorable para los organismos vivos”, refiriéndose a condiciones que alteran el desarrollo de la planta, tales como la disponibilidad de luz, nutrientes, agua, temperatura u oxígeno. En este sentido, el punto en el cual todas las condiciones son óptimas representa una situación teórica poco probable, en la cual el estrés sería nulo; cualquier otra condición se considera subóptima y, por tanto, estresante para el cultivo.

El estrés de cultivo puede clasificarse en estrés climático y estrés edafológico, en función del tipo de variable que lo genera. Las variables climáticas incluyen factores atmosféricos que influyen en el crecimiento vegetal, ya sea de forma directa o en combinación con el suelo, como temperatura, precipitación, radiación solar, viento, elevación y humedad relativa. En tanto, las variables edafológicas se refieren a

² INETER: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales

propiedades del suelo que afectan el desarrollo de los cultivos, como textura, profundidad, pH, materia orgánica, pendiente, capacidad de retención de agua y drenaje. Estos factores afectan procesos fisiológicos esenciales, como la fotosíntesis, la transpiración y la absorción de nutrientes, lo que puede traducirse en una reducción del crecimiento y del rendimiento agrícola (Physics, 2025).

6.3. Idoneidad Agrícola

Tomando el concepto anterior es muy fácil de definir Idoneidad Agrícola como “La aptitud de un terreno para soportar un tipo específico de uso, como el cultivo de una planta particular, de manera sostenida y productiva” (FAO³, A Framework for Land Evaluation, 1976). O en pocas palabras se refiere a un sitio en donde un cultivo puede desarrollarse de manera óptima con un nivel de estrés mínimo.

6.4. Edafología

Es la ciencia que se encarga de estudiar el suelo en todos sus aspectos; desde su morfología, su composición, las propiedades tanto físicas como químicas y biológicas, su formación y evolución, taxonomía y distribución, su utilidad, recuperación y conservación (Chavarría, 2007).

Tabla 2

Variables Edafológicas Relevantes para Evaluación de Idoneidad Agrícola

Variable	Definición
Textura del suelo	Proporción relativa de arena, limo y arcilla en el suelo. Afecta la retención de agua y aireación.
Profundidad del suelo	Distancia vertical que pueden alcanzar las raíces sin restricciones. A mayor profundidad, mayor volumen útil.
pH del suelo	Medida de acidez o alcalinidad. Afecta la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana.
Materia orgánica	Restos orgánicos en descomposición. Mejora fertilidad, estructura y retención de humedad del suelo.

³ Framework for Land Evaluation

Pendiente	Inclinación del terreno. Influye en la escorrentía, erosión y facilidad para mecanización.
Capacidad de retención del agua	Cantidad de agua que el suelo puede almacenar disponible para las plantas. Depende de textura y materia orgánica.
Drenaje	Capacidad del suelo para evacuar el exceso de agua. Mal drenaje puede causar anoxia radicular.

Nota. Elaboración propia Datos adaptados (FAO, Guidelines for Soil Description. 4th edition, 2006)

Dependiendo del cultivo y su variedad, cada uno posee un rango ideal de variables tanto edafológicas como climáticas, necesarias para su desarrollo óptimo.

6.5. Métodos tradicionales vs. enfoques computacionales

Las evaluaciones tradicionales de idoneidad agrícola se basan en observaciones de campo, conocimiento empírico y análisis manuales de suelos y clima. Si bien aportan información local relevante, presentan limitaciones para su aplicación a gran escala y para la integración objetiva de múltiples variables ambientales, además de ser procesos lentos y difíciles de replicar (Galán, 2021).

En contraste, los enfoques computacionales permiten evaluaciones sistemáticas mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), bases de datos edafoclimáticas y métodos multicriterio, facilitando la integración espacial de variables y la generación de mapas de idoneidad con mayor precisión y consistencia (Eastman, 2006). Asimismo, estos enfoques superan la visión puntual de la evaluación tradicional al incorporar criterios históricos y analíticos que fortalecen la toma de decisiones para una planificación agrícola más objetiva y sostenible (Morales, 2011).

- **Agricultura de precisión**

La agricultura de precisión aplica técnicas de mapeo de la variabilidad espacial para un manejo agrícola basado en datos, con el objetivo de mejorar la eficiencia y los rendimientos, al tiempo que reduce el uso de insumos como agua, fertilizantes y pesticidas (IICA⁴, 2014). Este enfoque integra tecnologías que permiten la recolección,

⁴ Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

almacenamiento y análisis de información espacial y temporal, tales como sensores remotos (satélites o drones), GPS⁵ y sistemas GNSS⁶ para el mapeo de campos; redes de sensores y dispositivos IoT para el monitoreo ambiental continuo; algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático para el procesamiento y predicción de patrones; y plataformas de computación en la nube para el almacenamiento y análisis colaborativo de grandes volúmenes de datos.

6.6 Sistemas de Información.

los sistemas de información son un conjunto de máquinas, programas informáticos y técnicas de trabajo utilizados para procesar datos específicos. Estos sistemas operan generalmente en tres fases (Hernández, 2018):

1. Captura de datos: Recolección de la información que será procesada.
2. Procesamiento de datos: incluye operaciones como cálculos, clasificación y traducción de la información.
3. Obtención de resultados: los datos procesados se presentan a los usuarios o se almacenan para su posterior.

- **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Más definitivamente los sistemas de información geográfica los describe IBM como (IBM, 2023) sistemas informáticos que producen visualizaciones conectadas de datos geoespaciales, es decir, datos referidos espacialmente a la Tierra.

Por lo tanto, más allá de crear visualizaciones, los sistemas SIG son capaces de capturar, almacenar, analizar y gestionar datos geoespaciales. Como ejemplo; el primer caso de uso de sistemas espaciales se produjo en 1854, cuando un médico británico John Snow cartografió las localizaciones de los brotes de colera de Londres y otros datos geográficos. Descubrió que los casos de colera se producían a lo largo de las líneas de agua.

⁵ Global Position System (Sistema de posicionamiento Global)

⁶ Sistema Global de Navegación por Satélite.

- **Sistemas de información Geográfica (SIG) en la agricultura**

El uso de los SIG en la agricultura permite a los agricultores cartografiar los datos del campo, organizarlos y analizarlos, así como monitorizar sus cultivos a distancia (FAO, *Geospatial Information for Sustainable Food Systems*, 2025). La FAO enfatiza que la agricultura de precisión depende en gran medida de los SIG para recopilar e interpretar grandes cantidades de datos de campo, lo que permite tomar decisiones con conocimiento de causa. En el marco de la presente investigación, los SIG constituyen la herramienta principal para la caracterización edafoclimática del territorio.

- **Ráster**

Un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas, formando una cuadrícula en la que cada celda almacena un valor que representa una variable espacial, como la temperatura, la precipitación o la elevación. Los rásteres pueden corresponder a fotografías aéreas digitales, imágenes satelitales, modelos digitales o mapas escaneados (ESRI, Diccionario SIG) (Saaty, 1980) (Malczewski, 1999). Estos archivos pueden ser correctamente representados sobre la superficie terrestre, ya que además de los valores almacenados en cada celda, incorporan metadatos de referencia espacial, tales como el sistema de coordenadas, la proyección y la resolución, los cuales permiten su ubicación precisa sobre áreas geográficas de interés.

6.7 Modelos de idoneidad agrícola y Superposición ponderada

Los modelos de idoneidad agrícola se pueden definir como modelos multicriterio que a su vez incorporan un conjunto de procedimientos que permiten la evaluación y priorización de alternativas espaciales, integrando múltiples criterios —frecuentemente en conflicto— en un solo marco de decisión (Malczewski J., 1999). En términos generales, se refiere a la integración de una serie de factores climáticos y edafológicos, a los cuales se les asignan pesos en función de su importancia relativa o del nivel de estrés que generan en el cultivo, con el objetivo de categorizar espacialmente las zonas según su aptitud para determinados cultivos.

- **Modelo de Idoneidad/Capacidad de GIS**

El Modelo de Idoneidad o Capacidad (Suitability/Capability) en GIS es un enfoque que permite evaluar la aptitud de diferentes áreas geográficas para un uso específico, ponderando las ubicaciones en relación con otras según criterios definidos.

Este modelo integra múltiples variables espaciales (climáticas, edafológicas, topográficas, socioeconómicas) y utiliza técnicas de análisis como:

- **Weighted Overlay (Superposición Ponderada) en Evaluación de Idoneidad Agrícola**

El Weighted Overlay es una técnica de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que combina múltiples capas ráster mediante una escala común, asignando pesos según la importancia relativa de cada variable y agregando los resultados para obtener un índice de idoneidad (ESRI⁷, *Diccionario SIG*). Se utiliza en la evaluación de idoneidad agrícola para integrar factores climáticos, edafológicos y topográficos, con el fin de identificar las áreas más aptas para un cultivo específico. El procedimiento general incluye la selección de variables relevantes, la normalización de las capas a una escala común (por ejemplo, 1 a 5), la asignación de pesos que suman 1 y el cálculo del índice final mediante la suma ponderada de los valores normalizados.

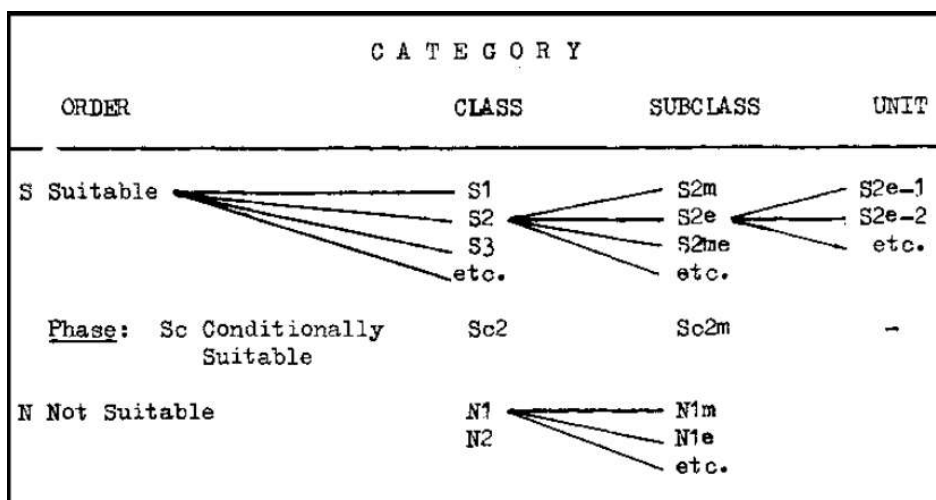
- **FAO Land Evaluation Framework**

El Marco para la Evaluación de la Tierra (FLE) es un conjunto de principios y conceptos que permite evaluar la idoneidad de la tierra a nivel local, nacional o regional. Se fundamenta en la idea de que la tierra puede clasificarse en categorías diferenciadas según su potencial para usos específicos. Este enfoque facilita la comparación y priorización de áreas para distintos fines agrícolas. (FAO, *A Framework for Land Evaluation*, 1976). Las categorías comúnmente utilizadas para la evaluación de la aptitud de tierras incluyen Muy adecuado (S_1), Moderadamente adecuado (S_2), Marginalmente adecuado (S_3) y No adecuado (N).

⁷ Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales

Figura 1

Framework FLE y su sistema de categorías



Nota. Fuente: FAO (1976).

Las categorías de idoneidad, también conocidas como clases de idoneidad, pueden subdividirse en subclases para reflejar diferencias menores en el potencial productivo. La idoneidad de la tierra se determina comparando las características del suelo con los requerimientos específicos del cultivo, permitiendo así identificar áreas más o menos aptas para un uso agrícola determinado. En este contexto, las características de la tierra son atributos medibles o estimables, como textura, profundidad, pendiente o fertilidad, mientras que las calidades de la tierra son atributos interpretados a partir de las características, que describen el potencial de uso, por ejemplo: “buena capacidad de retención de agua” o “propenso a erosión”.

El Marco de Evaluación de Tierras (FLE) constituye la base conceptual de la mayoría de los modelos modernos de evaluación de la idoneidad agrícola y puede integrarse con sistemas de información geográfica (SIG) para análisis espaciales más precisos. No obstante, su correcta aplicación requiere asignar un nivel de importancia o impacto a cada variable involucrada, diferenciando entre condiciones críticas y aceptables. Para ellos, el FLE se implementa juntamente con modelos de idoneidad o capacidad dentro del entorno SIG, lo que facilita la ponderación y la clasificación del territorio según su aptitud agrícola.

6.8 Modelo multicriterio y SIG

La evaluación de la idoneidad agrícola requiere integrar múltiples variables espaciales y temáticas —como tipo de suelo, precipitación, temperatura, pendiente y elevación— que influyen de manera combinada en el potencial productivo de un cultivo en un área determinada. Para abordar esta complejidad, los Modelos de Evaluación Multicriterio (MCE, por sus siglas en inglés) se han consolidado como una metodología eficiente en el análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Los modelos multicriterio permiten combinar criterios cualitativos y cuantitativos, ponderarlos según su importancia relativa, y producir un resultado final que represente el grado de idoneidad de cada zona del territorio analizado. Su principal ventaja es la capacidad de considerar simultáneamente múltiples factores de decisión, que pueden tener distintas unidades, escalas o niveles de impacto.

Uno de los métodos más ampliamente utilizados dentro de este enfoque es el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés - Analytic Hierarchy Process), propuesto por Thomas Saaty (Saaty, 1980). Este método estructura el problema en una jerarquía de criterios, subcriterios y alternativas, y luego utiliza matrices de comparación por pares para asignar pesos relativos a cada criterio. Los valores resultantes pueden integrarse en un SIG para producir mapas de idoneidad agrícola.

El uso conjunto de SIG con técnicas de evaluación multicriterio permite tomar decisiones más objetivas y fundamentadas en problemas complejos de planificación territorial, incluyendo la agricultura (Malczewski J. 1999)

- **Analytic Hierarchy Process (AHP):** Determina objetivamente los pesos relativos mediante comparaciones por pares.
- **TOPSIS⁸:** Es un método clásico de toma de decisiones multicriterio que busca la alternativa con la distancia euclidiana más corta a la Solución Ideal Positiva y la distancia euclidiana más larga a la Solución Ideal Negativa.

⁸ Técnica para la Preferencia de Orden por Similitud con la Solución Ideal

El resultado del modelo es un mapa de idoneidad, que clasifica el territorio en categorías como muy apto, moderadamente apto, marginalmente apto y no apto, facilitando la toma de decisiones para: Selección de áreas agrícolas para un cultivo específico, planificación de nuevas infraestructuras, identificación de hábitats favorables para especies. Este enfoque es ampliamente usado en SIG y permite integrar datos modernos de alta resolución para análisis precisos y flexibles (ESRI, *Diccionario SIG*).

6.9 Integración de Modelos Inteligentes en la planificación agrícola

Más allá de los métodos clásicos, un modelo inteligente, según Russell y Norvig (2021), permite que el sistema aprenda de la información disponible para actuar racionalmente. Dentro de los modelos inteligentes, las técnicas de regresión se emplean para estimar y predecir valores continuos a partir de la relación entre variables explicativas, permitiendo aprender patrones presentes en los datos y generalizarlos a nuevos escenarios. En el marco del aprendizaje automático, las regresiones han evolucionado desde enfoques clásicos hacia modelos regularizados y algoritmos basados en datos que mejoran la estabilidad, reducen el sobreajuste y optimizan el desempeño predictivo. En aplicaciones agroambientales apoyadas en SIG, los modelos de regresión facilitan la cuantificación de la influencia de variables climáticas y edáficas en la idoneidad de los cultivos, constituyéndose en herramientas fundamentales para la toma de decisiones en la planificación agrícola. En el contexto de esta investigación podemos integrar:

- **Elastic Net**

El Elastic Net es un método de regularización aplicado a modelos de regresión que combina las penalizaciones L1 (Lasso) y L2 (Ridge) con el fin de mejorar la selección de variables y reducir los efectos de la multicolinealidad entre predictores altamente correlacionados. Este enfoque fue propuesto por Hui Zou y Trevor Hastie como una alternativa al Lasso tradicional, el cual presenta limitaciones cuando las variables explicativas muestran alta correlación entre sí. Según los autores, Elastic Net permite una selección conjunta de variables relevantes y proporciona mayor estabilidad en la

estimación de los coeficientes, lo que resulta especialmente adecuado en conjuntos de datos complejos.

- **Modelo de Aprendizaje Random Forest**

Un modelo de Random Forest (Bosque aleatorio) y una red neuronal son diferentes tipos de inteligencia artificial (IA) que puedes utilizar para diversos fines. Random Forest es un algoritmo de aprendizaje automático basado en el enfoque de *ensemble learning*, que combina múltiples árboles de decisión para mejorar la precisión y la estabilidad de las predicciones. Su funcionamiento consiste en construir una gran cantidad de árboles utilizando diferentes subconjuntos aleatorios de los datos y de las variables predictoras, de modo que cada árbol aporte una predicción independiente.

En problemas de clasificación, la salida final del modelo se obtiene mediante la votación mayoritaria de los árboles, mientras que, en problemas de regresión, se calcula el promedio de las predicciones individuales. Esta estrategia reduce el sobreajuste común en los árboles de decisión individuales y mejora la capacidad de generalización del modelo.

7. Metodología del Trabajo Monográfico

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados y garantizar la robustez del estudio, la metodología se desarrolla bajo un enfoque mixto, al integrar componentes cualitativos y cuantitativos. El enfoque cualitativo se sustenta en la identificación, análisis y estandarización de los requerimientos edafológicos y climáticos, apoyados en criterios técnicos y el Marco de Evaluación de Tierras de la FAO, mientras que el enfoque cuantitativo se basa en el procesamiento de datos geoespaciales y climáticos, la aplicación de técnicas de Evaluación Multicriterio y el uso de algoritmos de inteligencia artificial.

El trabajo se ha estructurado en tres fases fundamentales, las cuales se detallan en el diagrama de flujo presentado en la Figura 2 a su vez en el anexo 7 se detalla el flujograma para el desarrollo del modelo.

La Fase I se centra en la caracterización y zonificación climática y edafológica del territorio nicaragüense mediante el procesamiento de datos geoespaciales e históricos. Posteriormente, la Fase II se realiza la identificación y caracterización de los requerimientos edafológicos y climáticos del cultivo estratégico seleccionado, considerando variables clave del suelo y del clima, las cuales son estandarizadas conforme al marco metodológico de la FAO para su posterior integración en el análisis de aptitud agrícola. Finalmente, la Fase III integra estos insumos para el desarrollo del modelo inteligente, combinando técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y algoritmos de inteligencia artificial

Figura 2

Metodología del Trabajo Monográfico.



Nota. Elaboración fuente propia

Fase 1: Adquisición de Datos y Caracterización Edafoclimática

En esta etapa se establecen las bases de datos espaciales necesarias para la evaluación territorial:

- Caracterización Edáfica:** Se llevará a cabo mediante la recopilación y procesamiento de información geoespacial proveniente de las Bases de Datos Globales de Suelo (SoilGrids) y los repositorios cartográficos oficiales de INETER. A través de la extracción y normalización de estas capas de información en un entorno SIG, se determinarán las variables edáficas clave para el territorio nicaragüense, tales como: textura del suelo, profundidad efectiva, pH, contenido de materia orgánica, pendiente, capacidad de retención de agua y drenaje interno.
- Caracterización Climática:** Dado que la dinámica climática requiere un análisis temporal distinto, se utilizará información histórica de los últimos 30 años para establecer la "Normal Histórica", siguiendo la metodología de cálculo recomendada por la FAO. La información se obtendrá de repositorios globales de alta precisión como

el Copernicus Climate Data Store y WorldClim. Las variables para procesar incluyen: temperatura, humedad relativa, precipitación, radiación solar, así como la elevación.

El producto final de esta fase consistirá en la generación de mapas temáticos (rasterización) para cada variable, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), específicamente el software QGIS.

Fase 2: Definición de Requerimientos de Cultivo y Estandarización (Marco FAO)

Esta fase tiene como objetivo identificar, caracterizar y estandarizar los datos edafológicos y climáticos de alta relevancia agrícola para el país, correspondientes al cultivo y la variedad seleccionada, como base para la evaluación de su aptitud agrícola. El proceso se divide en dos actividades principales:

1. **Selección y Análisis de Cultivo:** En esta actividad se identificarán los principales cultivos agrícolas de Nicaragua, seleccionando el cultivo y la variedad específica objeto de estudio en función de su rendimiento y relevancia productiva a nivel nacional. Posteriormente, se realizará la recopilación y sistematización de información técnica y productiva de la variedad seleccionada, integrando requerimientos edafoclimáticos teóricos con datos de producción real georreferenciados. Esta información permitirá la clasificación y estandarización de las variables climáticas y edáficas bajo el Marco de Evaluación de Tierras de la FAO, estableciendo la base técnica para el desarrollo del modelo de idoneidad agrícola.

2. **Clasificación de Idoneidad:** Los requerimientos recopilados se estandarizarán bajo el Marco de Evaluación de Tierras (Framework for Land Evaluation - FLE) de la FAO. Esto permitirá categorizar los rangos de las variables edafoclimáticas en clases de aptitud:

Fase 3: Desarrollo del Modelo Inteligente

La etapa final consiste en la construcción e integración del modelo de idoneidad, el cual opera mediante un enfoque híbrido que consta de dos evaluaciones:

- **Primera Evaluación (Ponderación Multicriterio):** Se define la aptitud base de cada variable (suelo y clima) asignando pesos específicos mediante el método de

Evaluación Multicriterio (EMC), aplicados sobre las clasificaciones estandarizadas (FLE) obtenidas en la fase anterior.

- **Segunda Evaluación (Ajuste con IA):** Se incorpora módulo de algoritmos de inteligencia artificial usando modelo de aprendizaje Random Forest Regressor y Elastic Net para modelar relaciones no lineales y refinar la evaluación. Estos modelos de aprendizajes evaluarán la criticidad de cada variable, su importancia relativa, aplicando un factor de ajuste que representa el impacto real de la variación de dicho parámetro sobre el rendimiento del cultivo.

8. Desarrollo del Trabajo Monográfico

El presente documento desarrolla el diseño de un modelo inteligente de idoneidad de cultivos orientado a la evaluación de las condiciones climáticas y edáficas, mediante un análisis integral multivariable que, apoyado en técnicas computacionales y Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite determinar la aptitud agrícola de un territorio en Nicaragua. Dicho modelo se ajusta a las necesidades del cultivo de estudio y aporta información relevante para la toma de decisiones en el ámbito de la planificación agrícola.

Para el desarrollo de la investigación, el documento se ha dividido en tres secciones. La primera sección se enfoca en la caracterización edafoclimática del territorio nicaragüense, información que constituye la base del estudio y la fuente principal para la delimitación de las distintas zonas agroecológicas del país. La segunda sección aborda el objeto de estudio, correspondiente a la investigación de un cultivo y su variedad de mayor importancia para la población nicaragüense. Finalmente, en la tercera sección se diseña el modelo de idoneidad agrícola, tomando en consideración los insumos obtenidos en las secciones anteriores.

Posterior al diseño del modelo de idoneidad agrícola, el documento presenta las conclusiones y recomendaciones derivadas del desarrollo del proyecto, las cuales permiten sintetizar los principales hallazgos obtenidos y proponer lineamientos orientados a la mejora del proceso de planificación agrícola, así como posibles aplicaciones futuras del modelo desarrollado.

8.1 Sección 1. Adquisición de datos y Caracterización edafoclimática

La presente investigación comprende el análisis de las variables edafoclimáticas descritas en la Tabla 1: Temperatura, precipitación, radiación solar, elevación y humedad relativa, además de las descritas en la Tabla 2: Variables edafológicas relevantes para la evaluación de idoneidad agrícola, las cuales incluyen: textura del suelo, profundidad efectiva, pH, materia orgánica, pendiente, capacidad de retención de agua y drenaje.

Para la adquisición de la información base, se consultaron inicialmente las fuentes primarias nacionales, particularmente el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales; sin embargo, su plataforma oficial no dispone de manera pública los datos suficientes y necesarios para el presente estudio. En consecuencia, se recurrió a fuentes internacionales de acceso abierto, ampliamente reconocidas por su rigor científico, cobertura global y calidad de sus sistemas de procesamiento y validación de datos. Entre estas destacan SoilGrids, WorldClim y el United States Geological Survey, las cuales proporcionan información geoespacial estandarizada y de alta resolución utilizada como insumo para la construcción del modelo de idoneidad.

Estas plataformas proporcionan información espacial en formato ráster a escala global, la cual se presenta como mapas continuos que contienen datos crudos asociados a cada variable. Dichos mapas se derivan de imágenes satelitales y modelos espaciales, donde cada píxel representa un valor específico de la variable analizada, correspondiente a un área determinada del territorio, expresada en metros cuadrados según la resolución espacial del archivo.

Cabe destacar que estas fuentes primarias de información no consideran las delimitaciones político-administrativas de los países, ya que su cobertura es de carácter global. Por esta razón, y debido a que el área de estudio corresponde al territorio de Nicaragua, fue necesario realizar un proceso de recorte espacial de los datos.

Este procedimiento se llevó a cabo mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), específicamente el software QGIS, utilizando herramientas de análisis ráster. El recorte se realizó a partir de un archivo de delimitación política

nacional en formato shapefile, el cual funciona como máscara espacial para extraer únicamente los valores correspondientes al área de estudio. Para este proceso se empleó la herramienta Extracción por máscara, disponible dentro del conjunto de herramientas ráster de QGIS. El archivo de delimitación política fue obtenido desde repositorios especializados, como GADM (Database of Global Administrative Areas).

Cada una de las variables edafoclimáticas es representada mediante un mapa temático independiente, el cual contiene información espacial asociada exclusivamente al territorio nicaragüense, expresada según la unidad de medida correspondiente a cada variable.

Los archivos ráster obtenidos no presentan una clasificación directa de los valores según su unidad de representación, por lo que inicialmente se visualizan en escalas de grises dentro de los sistemas SIG. En consecuencia, para su adecuada interpretación y análisis en estudios de idoneidad agrícola, fue necesario agrupar los valores continuos en rangos o clases, los cuales posteriormente se representan mediante escalas de color y leyendas en cada mapa.

El mapa de la Figura 9 correspondiente a la variable pH del suelo se presenta en formato ráster, donde cada píxel almacena el valor de pH en la ubicación geográfica correspondiente. Este mismo principio se aplica al resto de las variables edafológicas consideradas, con excepción de la textura del suelo, la cual se representa mediante tres mapas temáticos independientes, debido a su composición granulométrica y a su clasificación específica.

Por otra parte, la caracterización del territorio nacional, tanto desde el punto de vista climático como del suelo, representa una labor compleja debido a la diversidad de condiciones presentes en el país. Por tal motivo, en esta sección se detalla de manera estructurada el procedimiento y las fuentes específicas utilizadas para la adquisición de la información necesaria. En consecuencia, la sección 1 se encuentra dividida en tres partes, las cuales permiten organizar y comprender de forma progresiva el desarrollo de esta etapa.

- **Parte 1:** Investigación de las propiedades del suelo de Nicaragua.

- **Parte 2:** Investigación de las zonas climáticas que conforman el territorio de Nicaragua.

- **Parte 3:** Clasificación de las zonas climáticas y edafológicas de Nicaragua.

Parte 1: Investigación de las propiedades del suelo de Nicaragua

Las variables del suelo están comprendidas por las distintas propiedades que lo caracterizan. Estas propiedades, salvo en raras excepciones, presentan cambios muy lentos a lo largo del tiempo; por ello, un análisis espacial elaborado en períodos anteriores puede seguir siendo válido. Esta estabilidad temporal constituye una característica fundamental de las variables edafológicas, lo que permite su utilización confiable en estudios de evaluación territorial y de idoneidad agrícola.

A continuación, se detallan cada una las variables:

1. Textura del suelo

La textura del suelo se clasifica principalmente en arcillosa, limosa y arenosa, cada una con propiedades físicas específicas que influyen directamente en el desarrollo de los cultivos. Estos componentes no son excluyentes, ya que un mismo suelo puede presentar proporciones variables de cada uno. Por esta razón, la textura del suelo se representa mediante tres mapas temáticos independientes, correspondientes a los contenidos de arcilla, limo y arena.

Actualmente, existen diversos repositorios que proporcionan información sobre la textura del suelo. Entre ellos, SoilGrids ofrece conjuntos de datos globales de limo (silt), arcilla (clay) y arena (sand), disponibles en formato ráster y organizados por tipo de componente textural. Cada píxel representa el porcentaje del componente correspondiente, y la información se encuentra disponible a diferentes profundidades del suelo: 0–15 cm, 15–30 cm y 30–60 cm.

Cada profundidad responde a un objetivo de análisis específico; no obstante, en estudios agrícolas se estandariza el uso del intervalo de 15–30 cm, debido a que en esta capa se concentra gran parte del sistema radicular de los cultivos, lo que la convierte en la más representativa para la evaluación de la idoneidad agrícola.

En la práctica agrícola, la textura del suelo suele describirse mediante términos como franco, franco arenoso o franco arcilloso, utilizados comúnmente por técnicos y productores para referirse de forma cualitativa al comportamiento del suelo. Estas denominaciones se basan en la percepción al tacto, la facilidad de laboreo y la respuesta del cultivo, más que en valores numéricos precisos.

Desde un enfoque académico, la textura del suelo se expresa mediante los porcentajes de arena, limo y arcilla, cuya suma corresponde al 100 %. En el presente estudio se adopta este enfoque cuantitativo (ver Anexo 1), ya que resulta fundamental para el procesamiento digital de la información y para la integración precisa de esta variable edafológica dentro del modelo de idoneidad agrícola.

2. Profundidad del suelo

La profundidad del suelo se define como la profundidad efectiva disponible para el crecimiento de las raíces, es decir, el espesor de suelo que permite el desarrollo radicular hasta encontrarse con capas impermeables o roca madre.

La capa de profundidad al basamento rocoso (bedrock) fue obtenida del repositorio oficial del United States Geological Survey (USGS), el cual proporciona información geoespacial de acceso público y cobertura mundial. El archivo se encuentra en formato raster (TIF) y representa la profundidad estimada desde la superficie del suelo hasta el basamento rocoso, expresada en centímetros (cm). Este conjunto de datos resulta de gran utilidad para la presente tesis, ya que permite incorporar una variable edáfica fundamental en la evaluación de idoneidad agrícola, debido a su influencia directa en el desarrollo radicular, la disponibilidad de agua y las limitaciones físicas del suelo, contribuyendo así al análisis espacial y a la toma de decisiones para la aptitud de cultivos en Nicaragua.

3. pH del suelo

El pH del suelo es una medida que indica el grado de acidez o alcalinidad del suelo y constituye uno de los principales factores que controlan la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Su influencia se manifiesta directamente en los procesos químicos,

biológicos y físicos del suelo, afectando la absorción de macro y micronutrientes, la actividad microbiana y el desarrollo radicular.

En términos de idoneidad agrícola, el pH del suelo determina la aptitud de un territorio para el establecimiento y rendimiento de distintos cultivos, ya que cada especie presenta rangos óptimos de tolerancia. Suelos con pH extremadamente ácido o alcalino pueden generar deficiencias nutricionales, toxicidad por ciertos elementos y reducción de la actividad biológica, lo que limita la productividad.

El pH del suelo fue obtenido a partir de la base de datos pública SoilGrids, la cual proporciona información edafológica a escala global y en diferentes niveles de profundidad del suelo. Para el análisis de esta variable se utilizó el estrato correspondiente a 15–30 cm de profundidad, por considerarse representativo de la zona radicular activa para la mayoría de los cultivos agrícolas.

Los valores de pH proporcionados por SoilGrids se encuentran almacenados en el formato pH en agua multiplicado por diez, con el fin de evitar el uso de decimales en los archivos ráster. Por ello, dichos valores fueron convertidos a unidades reales de pH mediante la división entre diez, utilizando herramientas de análisis ráster en el software QGIS. Posteriormente, los valores obtenidos fueron clasificados en distintos rangos de pH, lo que permitió analizar la variabilidad espacial de la acidez y alcalinidad del suelo dentro del territorio nacional estableciendo un rango de unidad de medida del pH del suelo 0 a 14 siendo representado de la siguiente manera:

Tabla 3

Representación de la escala de pH del suelo

pH	Clasificación agrícola	Comentario / Impacto
0.0–0.9	Extremadamente ácido	No apto para cultivos, muy corrosivo.
1.0–1.9	Muy fuertemente ácido	Suelo extremadamente ácido, casi imposible de cultivar.
2.0–2.9	Fuertemente ácido	Pocos cultivos toleran, requiere enmiendas drásticas.
3.0–3.9	Moderadamente ácido	Muy limitante para la mayoría de los cultivos.
4.0–4.9	Ligeramente ácido	Algunos cultivos resistentes pueden crecer; requiere cal.
5.0–5.9	Ácido óptimo	Adecuado para cultivos ácidos como café y cacao.

6.0–6.9	Casi neutro / óptimo bajo	Ideal para la mayoría de los cultivos tropicales.
7.0–7.9	Neutro / óptimo alto	Perfecto para cultivos generales; buena disponibilidad de nutrientes.
8.0–8.9	Ligeramente alcalino	Puede afectar disponibilidad de micronutrientes.
9.0–9.9	Moderadamente alcalino	Problemas para cultivos sensibles; reducción de crecimiento.
10.0–10.9	Alcalino alto	Suelos pobres en fertilidad; limitante para cultivos.
11.0–11.9	Muy alcalino	Prácticamente no cultivable sin corrección intensiva.
12.0–12.9	Extremadamente alcalino	Suelo no apto para agricultura.
13.0–13.9	Extremadamente alcalino	Altamente corrosivo y tóxico para plantas.
14.0	Máxima alcalinidad	No apto para cultivos, solo usado en laboratorios o procesos industriales.

Nota: Elaboración propia. Fuente: Global Soil Information System (GloSIS)

4. Materia orgánica

La materia orgánica del suelo representa un valor porcentual asociado a la cantidad de nutrientes y a la calidad general del suelo, influyendo directamente en su fertilidad, estructura y capacidad de retención de agua. Para el presente estudio, la materia orgánica fue calculada a partir del Carbono Orgánico del Suelo (SOC, por sus siglas en inglés).

El valor de SOC fue obtenido desde el repositorio SoilGrids, el cual proporciona información espacial del carbono orgánico del suelo en formato ráster y a diferentes profundidades. A partir de este parámetro, la materia orgánica (MO) se calculó mediante la siguiente relación:

$$MOC (\%) = SOC * 1.76$$

Este factor de conversión se basa en la proporción promedio de carbono presente en la materia orgánica del suelo.

Para el análisis, se consideró una profundidad de 0–30 cm, debido a que este estrato corresponde a la capa superficial del suelo, donde se concentra la mayor actividad biológica y el desarrollo radicular de la mayoría de los cultivos evaluados en el estudio.

5. Pendiente

La pendiente del terreno representa la relación de cambio de la elevación y constituye un factor físico fundamental en la evaluación de la idoneidad del territorio, ya que los cultivos pueden quebrarse o no crecer idóneamente por deformaciones causadas por altas inclinaciones.

En términos de idoneidad agrícola, la pendiente condiciona la aptitud del territorio para el establecimiento de cultivos, ya que pendientes bajas favorecen la retención de humedad, reducen el riesgo de erosión y permiten la mecanización agrícola.

El análisis espacial de la pendiente permite identificar áreas con diferentes niveles de aptitud agrícola, clasificándolas desde zonas favorables hasta áreas con restricciones significativas para el uso productivo.

Para la obtención de la variable pendiente, se descargó inicialmente el TIF de Elevación desde la base de datos WorldClim, el cual presenta los valores de elevación expresados en metros sobre el nivel del mar. A partir de este insumo, se utilizó el software QGIS para derivar el mapa de pendiente mediante herramientas de análisis de ráster.

El cálculo de la pendiente se realizó empleando la herramienta “Pendiente” (Slope), la cual estima el grado de inclinación del terreno a partir de las variaciones de elevación entre cada píxel de la imagen. QGIS aplica algoritmos de análisis espacial que calculan la máxima tasa de cambio de elevación en las direcciones horizontal y vertical.

6. Capacidad de retención del agua

La variable capacidad de retención del agua o por sus siglas en inglés AWC, obtenida de la FAO GloSIS, representa el agua disponible en el suelo para los cultivos, expresada en milímetros por metro (mm/m) de profundidad de suelo. Los valores de AWC se clasifican en siete rangos, desde 0 mm/m (muy baja disponibilidad de agua) hasta 150 mm/m (alta disponibilidad), reflejando las diferencias en la capacidad de los suelos para almacenar agua útil. Esta variable es esencial en los modelos de idoneidad agrícola, ya que determina la cantidad de agua disponible para el crecimiento de los cultivos, afectando directamente la productividad y la selección de especies. Al ser un

dato global y de acceso público, permite integrar análisis espaciales confiables para la evaluación de la aptitud de cultivos en Nicaragua. Los rangos se han dividido en clases por AWC y se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.

Clasificación de la Capacidad de Retención de Agua Disponible (AWC) del Suelo

Clase AWC	Valor (mm/m)
1	150 mm/m
2	125 mm/m
3	100 mm/m
4	75 mm/m
5	50 mm/m
6	15 mm/m
7	0 mm/m

Nota: Elaboración propia. Fuente: Global Soil Information System (GloSIS)

7. Drenaje

El drenaje representa una importante variable para la idoneidad de cultivo ya que representa la capacidad natural del suelo de transportar el agua de la superficie a las capas profundas, evitando así el encharcamiento, zonas inundables o muy secas.

Esta propiedad es fundamental en los modelos de idoneidad agrícola, ya que un drenaje adecuado permite optimizar el crecimiento de las plantas, prevenir enfermedades relacionadas con exceso de humedad y seleccionar los cultivos más apropiados para cada tipo de suelo. Para el presente estudio, los datos de drenaje se obtuvieron de la plataforma HiHydroSoil v2.0, que proporciona información global en formato TIF de 250m por píxel sobre la conductividad de saturación hidráulica (Saturated hydraulic conductivity). Esta fuente, de acceso público, es ampliamente utilizada en análisis hidrológicos y estudios de aptitud agrícola, permitiendo integrar los patrones de drenaje en evaluaciones espaciales y modelos de idoneidad de cultivos en Nicaragua.

Parte 2. Investigación de las zonas climáticas que conforman el territorio de Nicaragua

A diferencia de las variables edafológicas, las variables climáticas presentan variaciones significativas a lo largo del tiempo, por lo que, para su análisis, se estudian

periodos específicos como años, meses o incluso días. Para estandarizar los estudios climáticos, se utiliza la Normal Histórica de Clima, que corresponde al promedio de una variable climática determinada calculado durante un periodo prolongado, normalmente de 30 años, para suavizar la variabilidad interanual y establecer una línea base estable para estudios de cambio climático. Esta normal refleja el valor promedio de cada variable por año, mes o día, y constituye la base fundamental de cualquier estudio o investigación climática. En el presente análisis de idoneidad de cultivos, se ha utilizado la Normal Histórica 1970–2000, la cual es ampliamente reconocida y aceptada en la comunidad científica para la caracterización climática y la modelación de idoneidad agrícola.

Las variables de estudio se muestran a continuación:

1. Temperatura

La temperatura es una variable climática fundamental que regula los procesos fisiológicos de las plantas y condiciona de manera directa el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos. Su influencia se manifiesta en la germinación de las semillas, la fotosíntesis, la respiración, la floración y la maduración, así como en la disponibilidad y absorción de nutrientes por parte del sistema radicular.

La variable determina la aptitud de un territorio para el establecimiento de diferentes cultivos, ya que cada uno de ellos presenta rangos térmicos óptimos, mínimos y máximos de tolerancia. Temperaturas fuera de estos rangos pueden generar estrés térmico, reducción de la productividad y, en casos extremos, pérdidas en la producción agrícola.

Para el estudio de la variable, se obtuvieron los datos del sitio web público de WorldClim, cabe destacar que la entidad hace uso del promedio de 30 años, por lo tanto, los datos obtenidos ya vienen normalizados y separado por mes del año. La manera de representación de los datos en el mapa es en Centígrados.

Cabe destacar que el repositorio WorldClim proporciona tres tipos de variables de temperatura: temperatura mínima, máxima y media diaria. Para el presente estudio se

utilizó la temperatura media, debido a que representa de manera más adecuada el comportamiento térmico general en cualquier sitio de estudio.

2. Precipitación

La precipitación es un factor climático clave que determina la disponibilidad de agua en los sistemas agrícolas y condiciona la productividad de los cultivos. La cantidad, distribución temporal y estacional de la lluvia influyen directamente en la humedad del suelo, la capacidad de retención de agua, la eficiencia del riego y la respuesta fisiológica de las plantas.

Para el presente estudio, la precipitación permite identificar zonas con condiciones hídricas favorables, moderadas o restrictivas para la producción de diferentes cultivos. Áreas con precipitaciones insuficientes pueden presentar limitaciones para el crecimiento de las plantas, mientras que precipitaciones excesivas incrementan el riesgo de erosión, encharcamiento y pérdidas de nutrientes, afectando la productividad y la sostenibilidad del sistema agrícola.

El análisis espacial de la precipitación se realizó descargando los datos de mapas ráster climáticos de referencia global desde el sitio web WorldClim, procesados mediante técnicas de análisis SIG en QGIS, permitiendo representar la variabilidad espacial de la lluvia dentro del territorio nacional. Los valores obtenidos se representan en milímetros dentro del archivo TIF con rangos de 0 a 1200 mm mensuales (Mínimo y máximo dentro de la normal histórica para Nicaragua).

3. Radiación solar

La radiación solar constituye una variable climática esencial, ya que regula la disponibilidad de energía necesaria para los principales procesos fisiológicos de las plantas, como la fotosíntesis, la evapotranspiración y el crecimiento vegetal. Su variabilidad espacial y temporal influye de manera directa en la productividad agrícola, el desarrollo fenológico de los cultivos y la eficiencia en el uso del agua.

Esta variable condiciona la capacidad de un territorio para sostener el crecimiento de las especies vegetales, dado que cada cultivo presenta requerimientos específicos de energía solar. Niveles adecuados de radiación favorecen la actividad fotosintética y el

rendimiento agrícola; en contraste, valores insuficientes pueden limitar el crecimiento y la producción, mientras que exposiciones excesivas pueden incrementar el estrés térmico y la demanda hídrica de los cultivos.

El análisis espacial de la radiación solar permite identificar áreas con condiciones energéticas favorables, moderadas o restrictivas para la agricultura, facilitando la planificación del uso del suelo, la selección de cultivos y el diseño de calendarios agrícolas. Para el estudio de la variable se obtuvieron los datos del sitio web WorldClim donde representan los valores de la variable en kilojulios (Kilojoules/Kj) por metro cuadrado.

4. Elevación

La elevación representa la altura del terreno con respecto al nivel medio del mar y constituye una variable base en los estudios climáticos y territoriales. Para este estudio, la información de elevación fue obtenida del repositorio WorldClim, el cual proporciona datos ráster de cobertura mundial y de acceso público. El archivo fue descargado en formato TIF, presentando los valores de elevación expresados en metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.), lo que permite su integración directa en análisis espaciales dentro de sistemas de información geográfica (SIG).

Aunque el punto de mayor elevación de Nicaragua corresponde al cerro Mogotón con aproximadamente 2,107 m s. n. m., el modelo de elevación de WorldClim presenta valores máximos cercanos a los 1,800 m. Esta diferencia se debe a la resolución espacial del ráster, ya que cada píxel representa un valor promedio de elevación, lo cual atenúa los valores extremos del relieve. Por esta razón, el modelo resulta adecuado para análisis climáticos, aunque no representa con exactitud los picos topográficos puntuales.

5. Humedad relativa

La humedad relativa fue calculada a partir de la presión de vapor de agua (water vapor pressure), expresada en kilopascales (kPa), información obtenida del repositorio WorldClim. Esta variable representa la cantidad real de vapor de agua presente en la atmósfera. A partir de este insumo, la humedad relativa se estimó mediante la relación

entre la presión real de vapor y la presión de vapor de saturación, la cual depende de la temperatura del aire, expresándose finalmente en porcentaje. Este procedimiento es ampliamente utilizado en estudios agroclimáticos, debido a su capacidad para representar adecuadamente las condiciones atmosféricas que influyen en el desarrollo vegetal.

Formula de Humedad Relativa

$$HR(\%) = \frac{e}{e_s} * 100$$

Presión de Vapor de agua:

$$e = \frac{\text{densidad de vapor} * R_v * T}{1000}$$

Parte 3. Clasificación de las zonas climáticas y edafológicas de Nicaragua

1. Zonas Climáticas

Nicaragua se caracteriza por presentar una marcada diferenciación climática, determinada principalmente por la presencia de dos estaciones bien definidas: la estación seca y la estación lluviosa. La estación seca se inicia generalmente en el mes de noviembre y se extiende hasta abril, periodo durante el cual las temperaturas aumentan de forma progresiva, alcanzando valores cercanos a los 31 °C en gran parte del territorio nacional. Estas condiciones térmicas predominan especialmente en las zonas bajas del Pacífico y del Caribe; sin embargo, en regiones como el norte y áreas montañosas del país, las temperaturas se mantienen relativamente más frescas, con promedios que oscilan entre 23 y 26 °C. Esta variabilidad espacial de la temperatura media se aprecia en las Figuras 3 y 4, donde se presenta la distribución de la temperatura clasificada en rangos de 0 a 35 °C. En dichas figuras se representan los meses de abril, considerado uno de los más cálidos del año, y junio, mes posterior al inicio de la estación lluviosa, lo que permite contrastar el comportamiento térmico antes y después de la entrada del invierno. Cabe destacar que, debido a que esta variable

cuenta con doce mapas (uno por cada mes del año), se optó por incluirlos en la sección de Anexo 4, con el fin de optimizar el espacio del documento principal.

El análisis de la temperatura media anual permite identificar regiones cálidas y muy cálidas en las zonas bajas del Pacífico y del Caribe, mientras que en áreas elevadas del norte y la región central del país se observan condiciones más frescas e incluso frías. En este contexto, la elevación del terreno actúa como un factor integrador que condiciona no solo la temperatura, sino también la humedad relativa, la radiación solar incidente y, en consecuencia, la distribución espacial de las zonas climáticas del país.

La humedad relativa se ve directamente influenciada por la temperatura, ya que representa la relación entre el vapor de agua presente en el aire y la cantidad máxima que este puede contener a una temperatura determinada. Por ello, un aumento de la temperatura sin variación en el contenido de vapor de agua provoca una disminución de la humedad relativa, mientras que una disminución de la temperatura genera un incremento de la misma. Esta relación se evidencia en la Figura 5, donde se muestra la distribución espacial de la humedad relativa en Nicaragua.

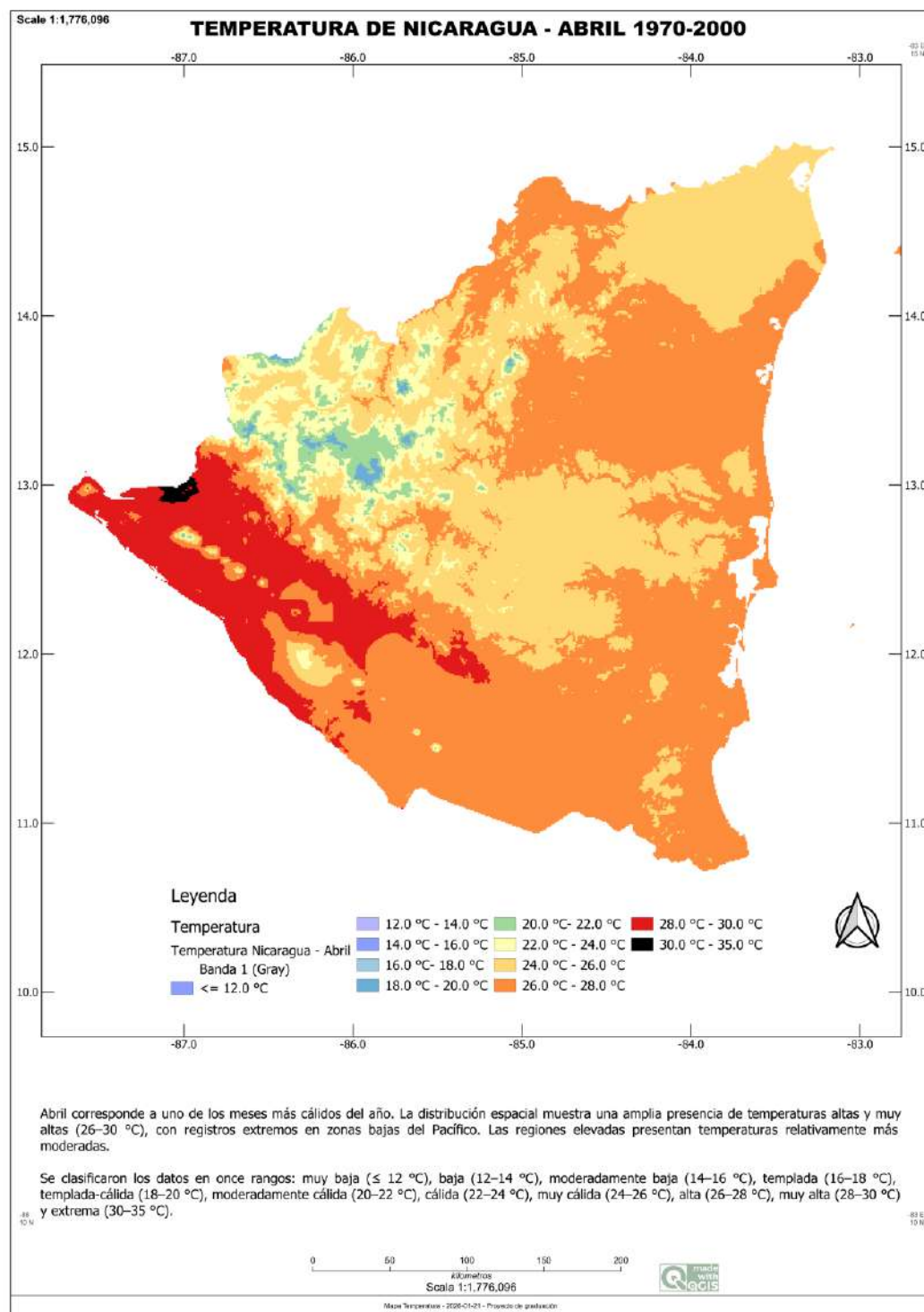
Asimismo, la radiación solar constituye una variable climática fundamental, ya que regula el balance energético del sistema climático y ejerce una influencia directa sobre la temperatura del aire, la evapotranspiración y los procesos fisiológicos de la vegetación. En Nicaragua, las zonas del Pacífico y las áreas con menor cobertura nubosa presentan valores elevados de radiación solar, especialmente durante la estación seca, lo que contribuye a temperaturas más altas y a una mayor demanda hídrica de los cultivos. Por el contrario, en la región Caribe y en zonas montañosas como la parte norte y ciertas zonas centrales del país, la mayor nubosidad reduce la radiación incidente, favoreciendo condiciones térmicas más moderadas y una mayor humedad ambiental.

Finalmente, la precipitación se encuentra estrechamente relacionada con la humedad relativa y la radiación solar, y constituye uno de los principales factores de clasificación climática del país. El Pacífico nicaragüense se caracteriza por condiciones secas a subhúmedas, con una marcada estacionalidad, mientras que el Caribe presenta un régimen húmedo a muy húmedo durante la mayor parte del año. Las regiones

centrales muestran condiciones intermedias, lo que genera una amplia diversidad agroclimática. La interacción entre temperatura, humedad relativa, radiación solar y precipitación permite establecer una clasificación climática clara del territorio nacional y fundamenta la incorporación de estas variables dentro del modelo de idoneidad territorial. Ver tabla 3 para una representación de la relación entre variables.

Figura 3

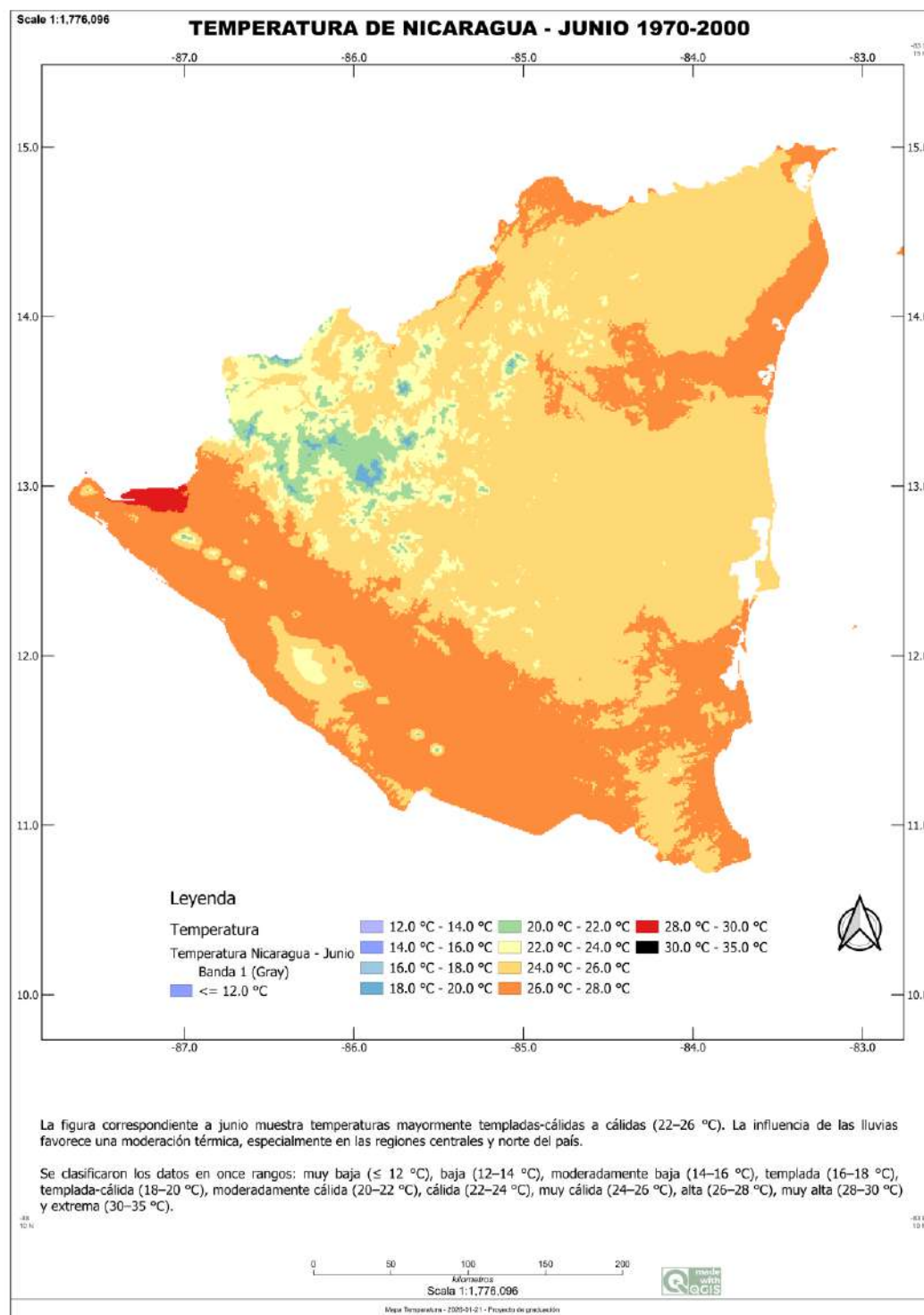
Mapa temático de temperatura de Nicaragua en el mes de abril.



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 4

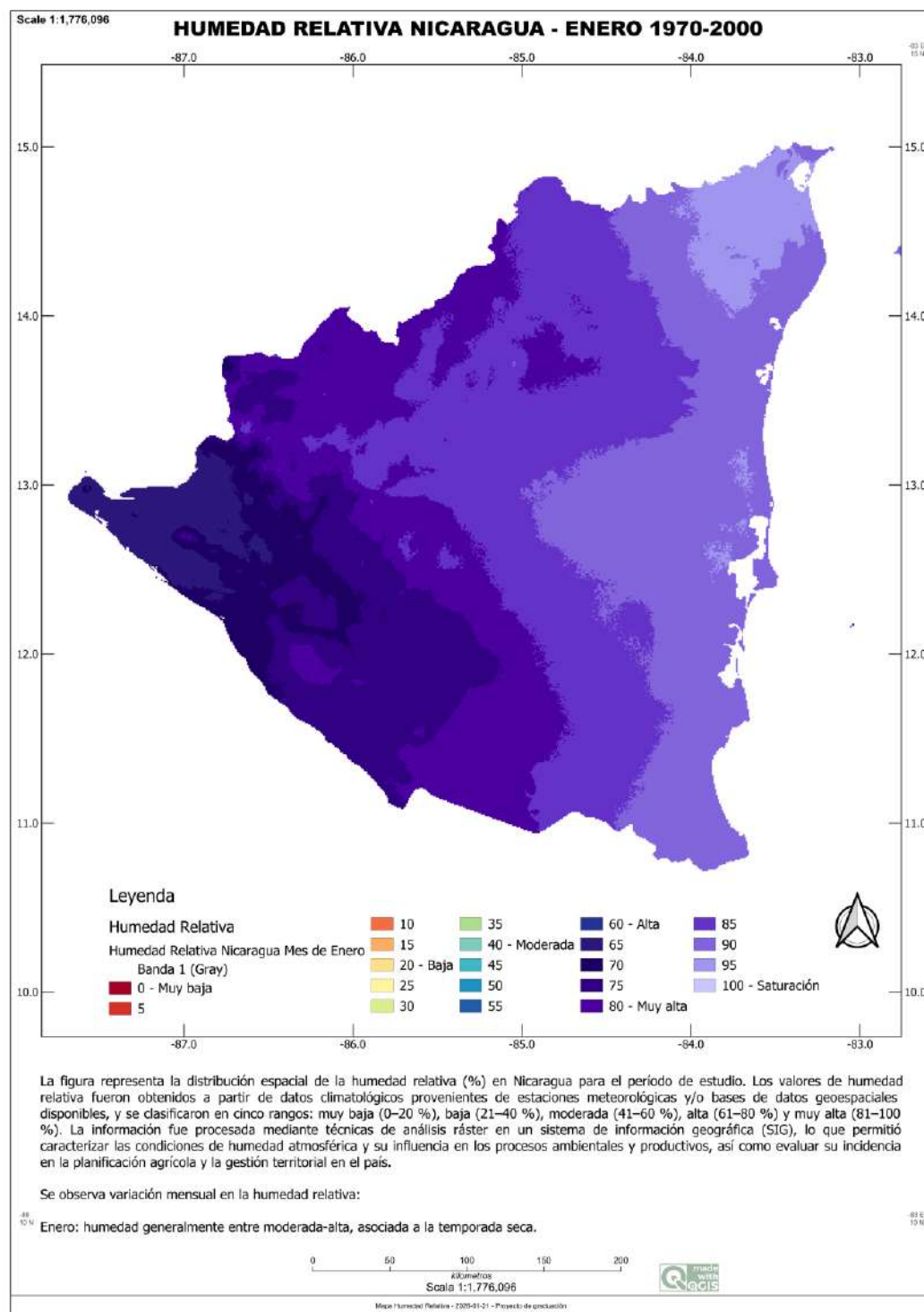
Mapa temático de la temperatura de Nicaragua en el mes de junio.



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 5

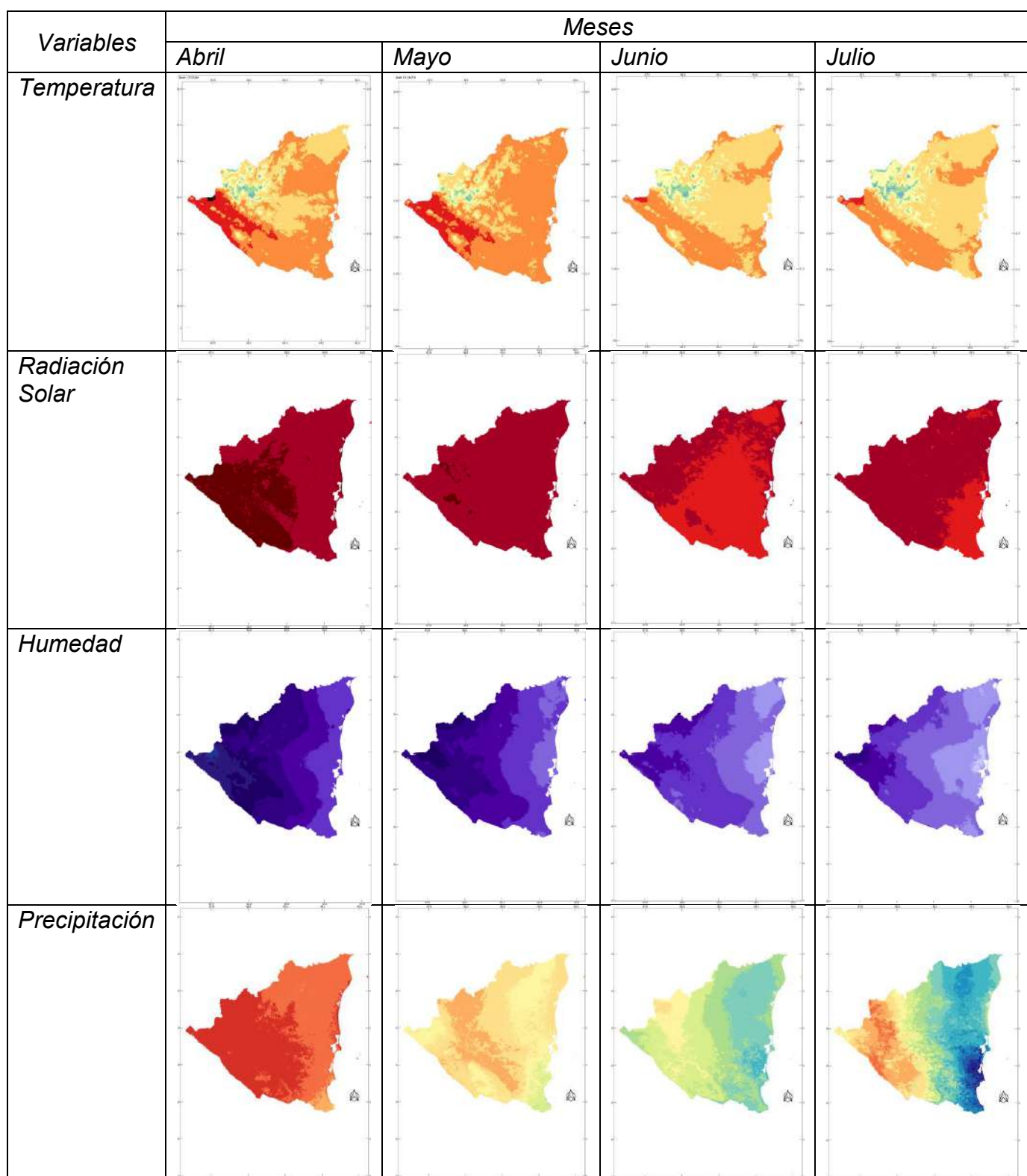
Mapa temático de la Humedad relativa en Nicaragua del mes de enero.



Nota: Generado con Software QGIS.

Tabla 5

Relación de variables a través de los meses de salida del verano y entrada del invierno.



Nota: Elaboración propia.

2. Zonas Edafológicas

En el territorio nacional predominan suelos de textura franca, franco arenoso y franco arcilloso, los cuales presentan un equilibrio favorable entre retención de humedad, aireación y disponibilidad de nutrientes, condiciones que los hacen altamente aptos para el desarrollo agrícola. Este tipo de suelo se distribuye principalmente en las planicies del Pacífico, el Norte y amplias zonas de la región central, donde se concentran las principales actividades agrícolas, como el cultivo de granos básicos (frijol, maíz), café y caña de azúcar. Suelos de textura franco arcilloso limoso y limoso ya que tiene porcentajes entre moderados y moderado-alto. Se puede apreciar esta clasificación en las Figuras 6, 7 y 8.

En zonas específicas también se identifican suelos arenosos, caracterizados por una rápida infiltración y baja capacidad de retención de agua, presentes con mayor frecuencia en áreas costeras del Pacífico y sectores del Caribe, donde su aptitud agrícola es generalmente media a baja, requiriendo prácticas de manejo como la incorporación de materia orgánica y riego controlado para mejorar la productividad. Por otro lado, los suelos arcillosos, que presentan alta retención hídrica, pero drenaje deficiente, se encuentran principalmente en zonas de relieve bajo y áreas de acumulación, especialmente en regiones del Caribe y la franja central. Estas variaciones permiten diferenciar áreas con aptitud agrícola alta, media o baja según el comportamiento físico del suelo.

La profundidad del suelo constituye otro elemento fundamental dentro de la clasificación edafológica, ya que define el espesor efectivo disponible para el desarrollo radicular, el almacenamiento de agua y la disponibilidad de nutrientes. En Nicaragua se identifican suelos superficiales, moderadamente profundos y profundos. Los suelos superficiales, generalmente asociados a zonas montañosas, áreas de fuerte pendiente y sectores del Norte y Centro, presentan restricciones para el crecimiento radicular, menor capacidad de retención de humedad y limitada reserva de nutrientes.

La profundidad del suelo se relaciona directamente con la capacidad de retención de agua, mientras que la textura controla los procesos de infiltración, retención y drenaje.

Así, los suelos profundos a muy profundos, con texturas francas o franco arcillosas, predominan en la región del Pacífico, favoreciendo un alto almacenamiento de agua, buen drenaje y adecuado desarrollo radicular, lo que confiere alta idoneidad agrícola. En contraste, las regiones norte y centro presentan suelos moderadamente profundos a superficiales, donde la topografía montañosa y las pendientes pronunciadas limitan la retención de agua y aumentan el riesgo de erosión; aquí la pendiente también se convierte en un factor relevante dentro de la clasificación de aptitud agrícola. Ya que las áreas con pendientes moderadas a fuertes, comunes en las regiones montañosas del norte del país, presentan mayor riesgo de erosión y limitaciones para el uso agrícola intensivo.

El drenaje complementa estas variables, ya que influye directamente en la disponibilidad de agua útil para los cultivos. En el Caribe, la combinación de suelos arcillosos y drenaje limitado puede restringir la idoneidad agrícola, siendo más aptos para cultivos tolerantes a la humedad o sistemas silvopastoriles.

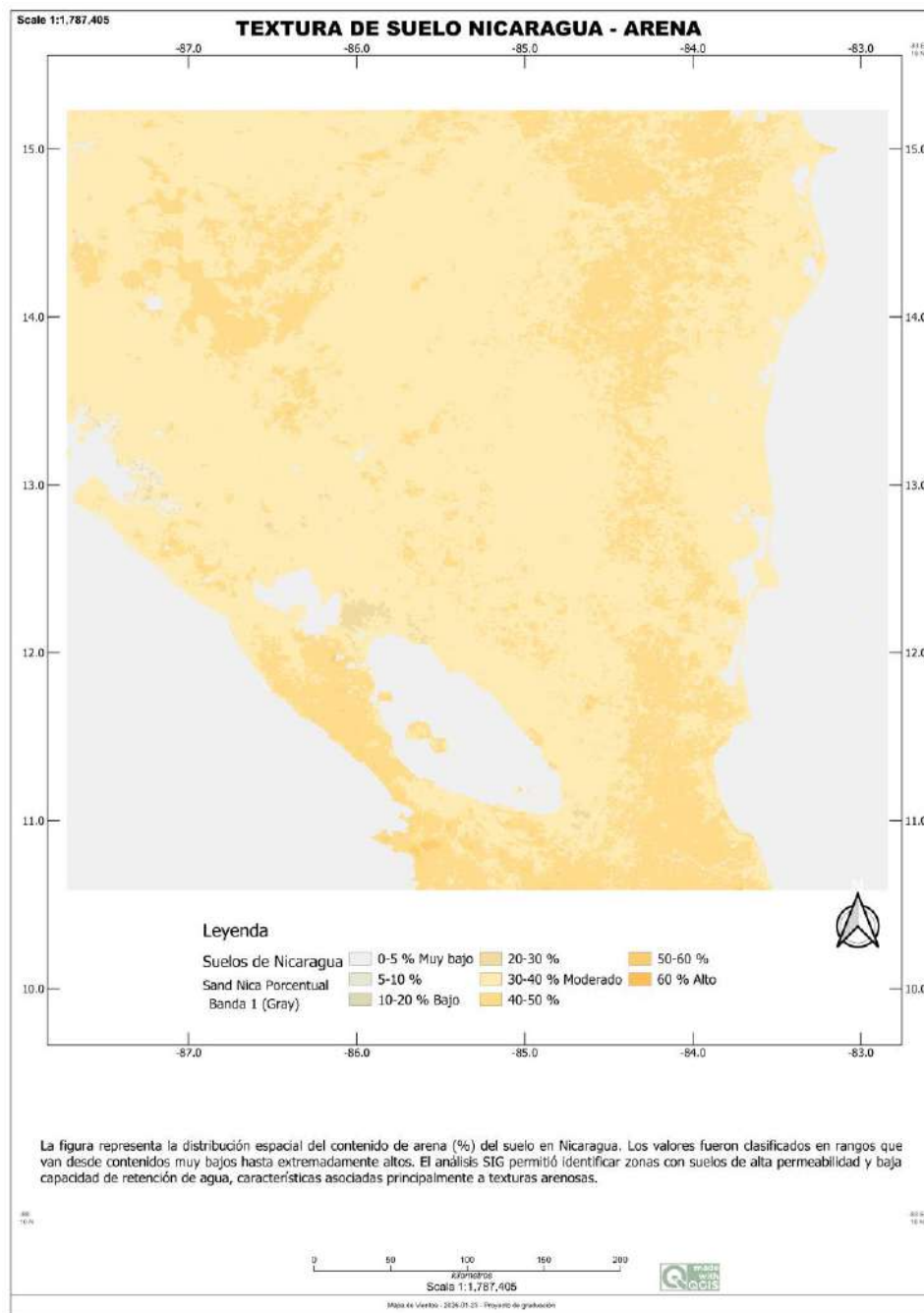
El pH del suelo, otro criterio edafológico importante, permite clasificar áreas con acidez variable. Predominan suelos ligeramente ácidos a moderadamente ácidos, especialmente en las regiones Norte, Centro y Caribe, mientras que en el Pacífico se observan suelos con pH cercano a la neutralidad, lo que favorece la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular. En la figura 9 podemos observar la distribución espacial del pH del suelo.

Finalmente, el contenido de materia orgánica aporta fertilidad, mejora la estructura del suelo y aumenta la capacidad de retención de agua. Las áreas con bajos niveles de materia orgánica presentan menor aptitud agrícola, mientras que suelos con contenido medio a alto, especialmente en las regiones de planicies del Pacífico y llanuras del Caribe, favorecen un alto potencial productivo.

A continuación, se presentan las variables analizadas junto con su correspondiente clasificación según las zonas edafológicas del territorio de estudio. La totalidad de los mapas temáticos generados para esta clasificación se encuentra disponible en el Anexo 4.

Figura 6

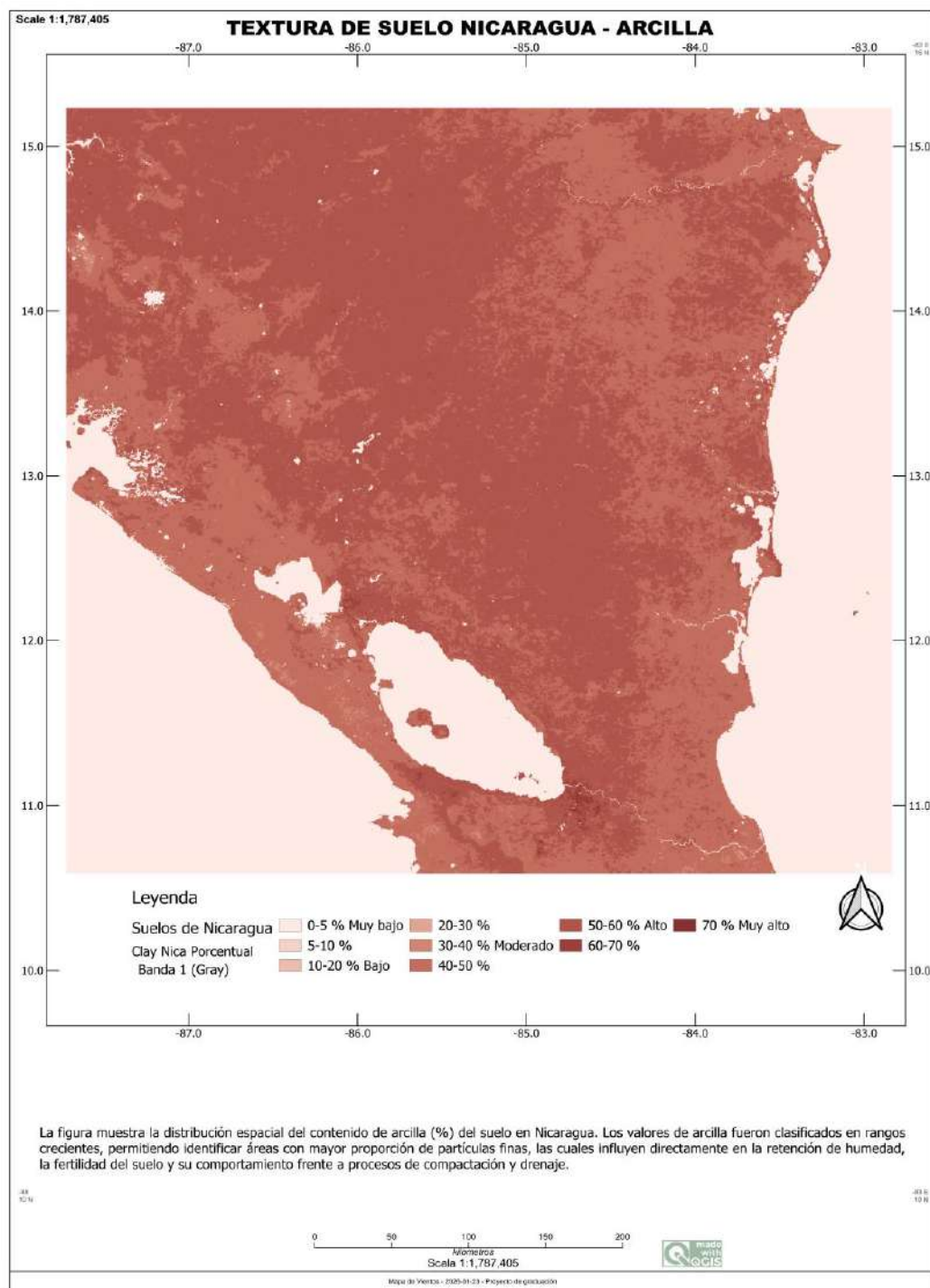
Mapa temático de suelo Arenoso de Nicaragua.



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 7

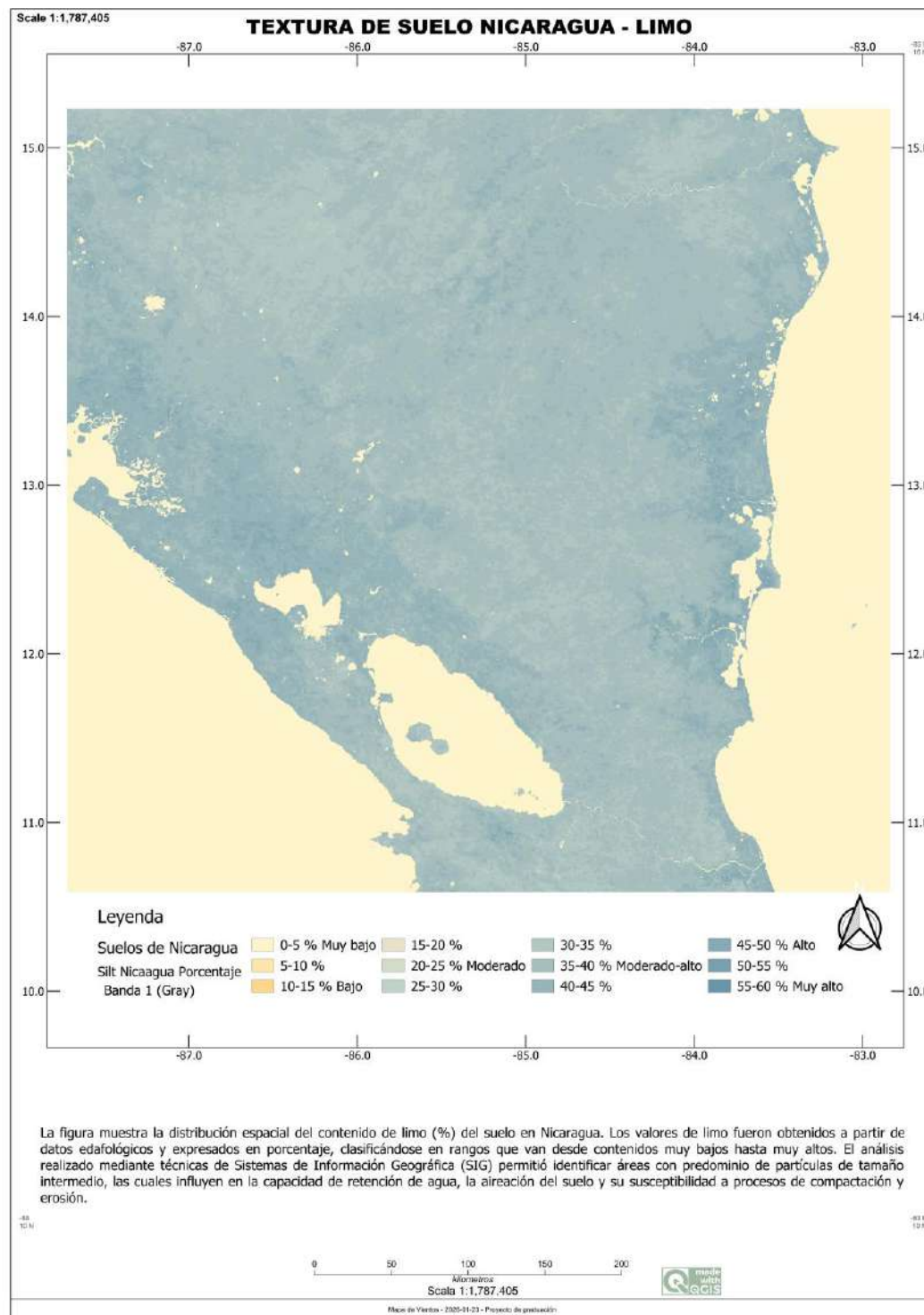
Mapa temático de suelo Arcilloso de Nicaragua.



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 8

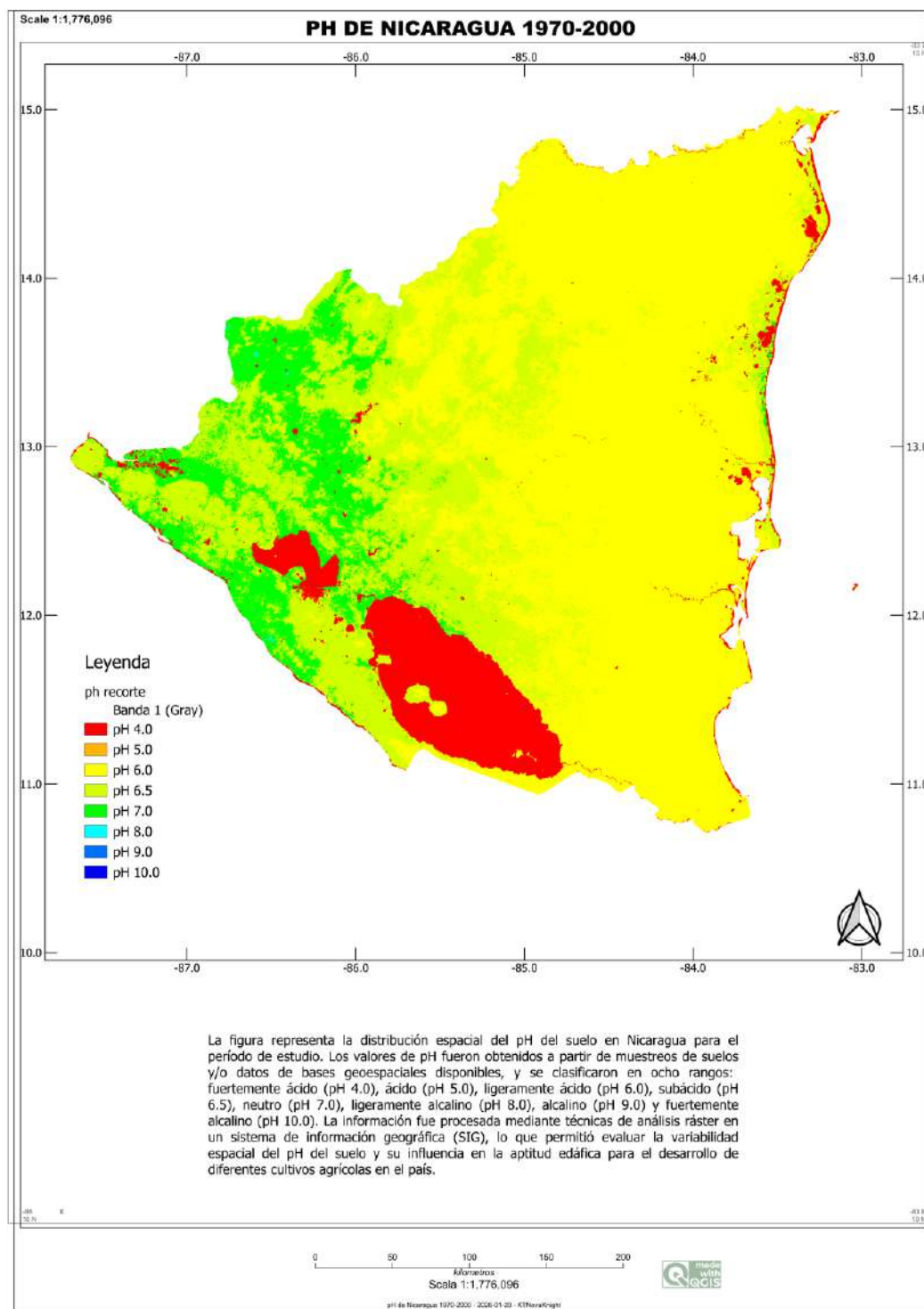
Mapa temático de suelo Limo de Nicaragua.



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 9

Mapa temático de pH del suelo en Nicaragua.



Nota: Generado con Software QGIS.

8.2. Sección 2. Definición de Requerimientos de Cultivos y Estandarización (Marco FAO)

De acuerdo con la Fase 2 de la metodología propuesta, en esta sección se presenta la selección del cultivo y la variedad de estudio, así como la definición de los requerimientos edafoclimáticos bajo el Marco de Evaluación de Tierras de la FAO.

Parte 1: Identificar los principales cultivos de Nicaragua y seleccionar el cultivo específico para el análisis

Nicaragua cuenta con una amplia diversidad de cultivos gracias a sus distintas zonas agroecológicas. En el caso de los granos básicos, el maíz es el cultivo más representativo, ocupando aproximadamente 46% del área cosechada de granos básicos, seguido por frijol (39%), arroz (15%) (FAO-FAOSTAT, 2023). En cuanto a cultivos comerciales de importancia económica, la caña de azúcar representa alrededor del 41% de la producción entre estos cultivos, seguida por banano (5%), cacao (0.5%) y café (0.02%) (FAO-FAOSTAT, 2023).

Dentro de estos, el maíz (*Zea mays*⁹) se consolida como el cultivo principal del país debido a su profunda importancia alimentaria, socioeconómica y cultural, siendo la base de la dieta diaria y de productos tradicionales como tortillas, tamales y diferentes bebidas. Este cultivo se siembra en prácticamente todo el territorio nacional, con más de 196,000 manzanas sembradas y la participación de 177,000 familias productoras en el ciclo agrícola 2025–2026, lo que evidencia su rol clave en la seguridad alimentaria y en la economía rural del país (MAG, 2025). La producción nacional puede alcanzar más de 5.1 millones de quintales, garantizando el abastecimiento de los mercados internos y contribuyendo a la estabilidad de precios (MAG, 2025). Además, el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) impulsa la innovación del cultivo mediante el desarrollo y liberación de nueve variedades y tres híbridos de maíz, que han demostrado rendimientos superiores y mayor resistencia a plagas, sequía y enfermedades. Asimismo, el INTA promueve nuevas tecnologías de arreglo de siembra y prácticas agronómicas que incrementan la productividad, mejoran la eficiencia y reducen costos de producción, fortaleciendo la competitividad del maíz en

⁹ **Zea mays**: Denominación científica del cultivo de maíz, clasificado taxonómicamente dentro del género *Zea* y la especie *mays*, de la familia Poaceae.

diferentes zonas agroecológicas del país (INTA, 2024; INTA, 2025). Estas acciones combinadas de producción, investigación y transferencia tecnológica reafirman al maíz como el cultivo más estratégico de Nicaragua, tanto por su valor alimentario como por su impacto en el desarrollo rural y la economía nacional.

Parte 2: Investigar las variedades del cultivo seleccionado y seleccionar la variedad a estudiar

En Nicaragua, el cultivo de maíz presenta una diversidad de variedades mejoradas y algunos híbridos que han sido desarrollados y promovidos para mejorar la productividad, adaptabilidad y resistencia a condiciones adversas. Entre las variedades más difundidas por el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) y utilizadas por los productores se encuentran NB-6, NB-9043 (Catacama), NB-S, Nutrinta Amarillo y Nutrader, además de híbridos como H-INTA 991 y Mazorca de Oro, entre otros materiales genéticos que se ajustan a distintas zonas agroecológicas del país. Estas variedades ofrecen ventajas como tolerancia a altas temperaturas, resistencia a plagas y enfermedades, buena cobertura de mazorca y rendimientos superiores a los de materiales tradicionales, lo que ha fortalecido su adopción en los ciclos agrícolas nacionales (INTA, 2024; INTA, 2025).

Para el presente estudio se ha seleccionado la variedad NB-6, la cual es una de las más establecidas entre los productores nicaragüenses debido a su adaptabilidad a diversas condiciones agroecológicas, estabilidad en rendimiento y facilidad de manejo para pequeños y medianos agricultores. NB-6 es una variedad mejorada de maíz con buena tolerancia a condiciones de estrés, y se ha promovido dentro de los programas de semilla mejorada del INTA por su desempeño en campo y su aceptación entre las familias productoras, lo que la convierte en una opción representativa para evaluar la idoneidad del cultivo en el contexto nacional (INTA, 2024; INTA, 2025).

La siembra de la variedad NB-6 se recomienda en 11 departamentos de Nicaragua, abarcando zonas del corredor seco y áreas con condiciones agroecológicas diversas. Estos departamentos son Managua, Chontales, Boaco, León, Chinandega, Jinotega, Matagalpa, Masaya, Carazo, Granada y Estelí. Esta amplia distribución demuestra la

adaptabilidad de la variedad a diferentes regiones del país y su potencial para ser utilizada en diversos sistemas de producción agrícola.

Parte 3: Investigar los requerimientos climáticos y edafológicos de la variedad seleccionada

La variedad de maíz NB-6 presenta requerimientos edafoclimáticos específicos para un adecuado desarrollo y rendimiento en el campo, algunos de estos se detallan en la tabla 3, mientras que la información completa se presenta en el anexo 1. En cuanto a la elevación, esta variedad se adapta a rangos que van desde 0 hasta 2000 msnm, lo que permite su establecimiento en una amplia diversidad de zonas agroecológicas del territorio nacional. Prefiere suelos con texturas francas, franco arenosas y areno arcillosas, condiciones que favorecen un adecuado drenaje y una correcta aireación del sistema radicular. Respecto a la precipitación durante el ciclo del cultivo, la NB-6 se desarrolla adecuadamente en zonas con disponibilidades hídricas entre 600 y 1200 mm. En relación con la pendiente del terreno, se recomienda su establecimiento en áreas con pendientes de 0° hasta 30°, lo que facilita las labores agrícolas y reduce riesgos de erosión. En cuanto al pH del suelo, la variedad presenta un mejor comportamiento en rangos de 6.0 a 7.0 en la escala del pH, correspondientes a suelos ligeramente ácidos a neutros. Finalmente, la temperatura promedio óptima para su crecimiento oscila entre 18 °C y 30 °C, valores característicos de las condiciones climáticas predominantes en Nicaragua. Estos requerimientos confirman que la variedad NB-6 es altamente adaptable y representativa para el país, especialmente en zonas con clima cálido y disponibilidad de agua moderada.

Tabla 6

Resumen de requerimientos del Maíz NB-6.

Rango	Elevación	Textura Suelo	Precipitación del ciclo	Pendiente	pH	Temperatura
Desde	0msnm	Francos, Franco arenosos y Areno arcillosos	600 mm	0°	6	18° (promedio)

Hasta	2000 msnm		1200 mm	30°	7.0	30° (promedio)
-------	--------------	--	---------	-----	-----	-------------------

Nota: Elaboración propia. Información de divulgación por INTA.

Para la variedad de maíz NB-6, la producción registrada en las diferentes localidades evaluadas en Nicaragua evidencia una variabilidad espacial en los rendimientos, asociada a las condiciones edafológicas, climáticas y de manejo agrícola propias de cada territorio. De acuerdo con los datos observados a nivel municipal, los rendimientos obtenidos oscilan entre 21 qq/mz y 53 qq/mz (ver Anexo 3), lo cual refleja el desempeño del cultivo bajo condiciones reales de producción.

Según el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA), la producción comercial esperada para la variedad NB-6 se sitúa entre 60 y 79 qq/mz, con un período de madurez que varía entre 110 y 115 días a cosecha, bajo condiciones óptimas de manejo agronómico. La NB-6 corresponde a una variedad mejorada de maíz blanco, desarrollada con el objetivo de adaptarse a las condiciones agroecológicas predominantes en Nicaragua.

Entre sus principales características agronómicas destacan su tolerancia a períodos de sequía y su resistencia a la pudrición de mazorcas, atributos que le confieren una mayor estabilidad productiva frente a escenarios de variabilidad climática. Estas cualidades convierten a la variedad NB-6 en una opción estratégica para las zonas maiceras del país, especialmente en contextos donde las limitaciones hídricas y las condiciones edafoclimáticas representan factores determinantes para la sostenibilidad de la producción agrícola.

La tabla completa con los datos de producción por departamentos y municipios se presenta en el Anexo 3.

Parte 4: Clasificar las variables (clima, suelo) según FLE para la variable del cultivo

La clasificación de las variables edafoclimáticas se realizó siguiendo la metodología FLE, estructurándose en niveles de orden, clase y subclase según corresponda. Se definieron las categorías de aptitud de la siguiente manera: S_1 representa valores

'Óptimos', S_2 valores 'Buenos' y N valores 'No aptos' para el desarrollo del cultivo de maíz. Por su parte, las subclases identifican las limitaciones marginales específicas dentro de los rangos de cada requerimiento.

Adicionalmente, dado que algunas variables se definen mediante intervalos, se estableció un valor de referencia ideal denominado S_{1-t} o 'Teóricamente óptimo'. Este valor se determina como el valor central para los intervalos cerrados, o como el valor umbral de referencia para aquellas variables con rangos abiertos (valores mínimos o máximos definidos). El detalle de estas clasificaciones se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7

Clasificación de variables edafoclimáticas según metodología FLE para el maíz NB-6

Variables	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)
pH del suelo	S_t	6.5	-
	S_1	6.0 – 7.0	Neutro
	S_2	5.5 – 5.9	(Acidez)
	S_3	7.1 – 7.5	(Alcalinidad)
	N	< 5.5 o > 7.5	(Toxicidad/Déficit)
Materia orgánica (%)	S_1	≥ 2.0	(Alta Fertilidad)
	S_2	1.0 – 2.0	(Fertilidad)
	N	< 1.0	(Esterilidad)
Pendiente (%)	S_t	2.5	-
	S_1	0 – 5	(Superficial/plana)
	S_2	5 – 15	(Erosión)
	N	> 15	(Topografía/Moderada)

Profundidad efectiva (cm)	S_1	≥ 90	(Enraizamiento óptimo)
	S_2	60 – 90	(Suelo físico)
	N	< 60	(Enraizamiento limitado/Restricción para cultivo)
Temperatura media diaria (°C)	S_t	24	-
	S_1	18 – 30	(Clima Adecuado)
	S_2	15 – 18	(Riesgo de marchitarse)
	N	< 15 o > 32	(Pérdida de cosecha)
Precipitación por ciclo productivo total (mm)	S_t	900	-
	S_1	600 – 1200	(Agua suficiente)
	S_2	1200 – 1800	(Mantener un manejo de agua nivelado)
	S_2	400 – 600	(Mantener un manejo de agua nivelado)
	N	< 400 o > 1800	(Estrés Hídrico poca agua o Encharcamiento)
Humedad relativa (%)	S_t	75	-
	S_1	70 – 80	(Humedad adecuada)
	S_2	80 – 90	(Riesgo de enfermedades)

	S_2	60 – 70	(Riesgo de estrés hídrico)
	N	< 60 o > 90	(Sequía o Exceso de humedad, bajo rendimiento)
Elevación (m.s.n.m.)	S_t	1000	-
	S_1	0 – 2000	(Elevación óptima)
	S_2	2000 – 4000	(Rendimiento reducido)
	N	> 4000	(Estrés por temperatura y falta de oxígeno)
Capacidad de retención (CRH, mm/m)	S_1	Alta (150 mm/m)	(Alta disponibilidad de agua)
	S_2	Media (<150 mm/m)	(Humedad)
	S_2	Media (>= 100 mm/m)	(Humedad)
	N	Baja (<100mm/m)	(Sequía)
Drenaje (Cm/Día)	S_1	Óptimo (>= 50 cm/día)	(Retención suficiente y buen drenaje)
	S_2	Moderado (>=10 cm/día)	(Oxigenación)
	S_2	Moderado (< 50 cm/día)	(Oxigenación)
	N	Pobre (<10 cm/día)	(Exceso de agua)
	S_1	Franco, Franco limoso, Franco Arcilloso	(Suelo favorable)

Textura del suelo	S_2	Franco arenoso, Arcillo Arenoso	(Requiere riego frecuente)
	S_3	Arcilloso	(Riesgo de encharcamiento, drenaje deficiente)
	N	Arenoso / muy arenoso / Arenoso franco /Limoso/ Franco arcillo arenoso/ Franco arcillo limoso/ Arcillo limoso	(Suelo sin retención de agua y poca fertilidad)
Radiación solar (KJ/m²/día)	S_t	Óptimo (19,900 kJ/m ² /día)	-
	S_1	Alta (19,200 -20,600 kJ/m ² /día)	(Fotosíntesis y crecimiento óptimo)
	S_2	Muy alta ($\geq 20,600$ kJ/m ² /día)	(Potencialmente bueno, riesgo de estrés de calor en caso de Muy alta radicación)
	S_2	Moderada (16,400-19,200 kJ/m ² /día)	(Rendimiento promedio)
	N	Muy bajo (< 16,400) y extremadamente alto ($\geq 22,000$ kJ/m ² /día)	(Rendimiento bajo y crecimiento muy limitado)

Nota: Elaboración propia.

8.3. Sección 3. Desarrollo del Modelo Inteligente

Parte 1: Aplicación del método evaluación multicriterio de las clasificaciones de FLE

Los criterios considerados en la Evaluación Multicriterio corresponden a las variables edafoclimáticas previamente clasificadas mediante el enfoque de Evaluación de Tierras de la FAO (FLE).

Las clases de aptitud obtenidas mediante la metodología de Evaluación de Tierras de la FAO (FLE) fueron transformadas a valores numéricos estandarizados con el propósito de integrarlas al método de Evaluación Multicriterio (EMC). Este proceso de estandarización permitió convertir categorías cualitativas en valores cuantitativos comparables, facilitando su incorporación al modelo inteligente de evaluación de idoneidad agrícola.

Para aquellas variables que cuentan con un valor de referencia ideal, se definió un parámetro denominado S_t o “teóricamente óptimo”, el cual fue establecido con un valor de 1.00, representando el óptimo absoluto de aptitud. A partir de este valor, la categoría S_1 fue determinada como el punto medio entre el valor S_t (1.00) y la categoría S_2 (0.75, moderadamente apta), obteniéndose un valor de 0.875, el cual fue redondeado a 0.88 para facilitar su interpretación y aplicación en el análisis multicriterio. La categoría S_2 representa un nivel intermedio de aptitud, mientras que la categoría N corresponde a condiciones no aptas, asignándosele un valor mínimo de 0.00. Este esquema de normalización se enmarca en la escala estandarizada utilizada en Evaluación Multicriterio, la cual se fundamenta en la literatura especializada (Malczewski & Rinner, 2015; Triantaphyllou, 2000), donde se recomienda el uso de valores normalizados entre 0 y 1, con separaciones proporcionales entre niveles de aptitud (máximo = 1.00, intermedio alto $\approx$ 0.85–0.90, intermedio $\approx$ 0.75 y mínimo = 0.00). Esta jerarquización garantiza una representación proporcional y coherente de los distintos grados de aptitud.

Para aquellas variables que no disponen de un valor S_t teórico, la categoría S_1 se considera directamente como el nivel óptimo de aptitud y se le asigna un valor EMC

de 1.00, representando la condición más favorable para el cultivo. En estos casos, las categorías S_2 y N conservan sus valores estándar de 0.75 y 0.00, respectivamente, reflejando condiciones moderadamente aptas o no aptas para el desarrollo del cultivo.

A continuación, se presentan las clasificaciones EMC por cada variable con su respectiva tabla y gráfica representando su distribución EMC:

1. PH Del Suelo

Tabla 8

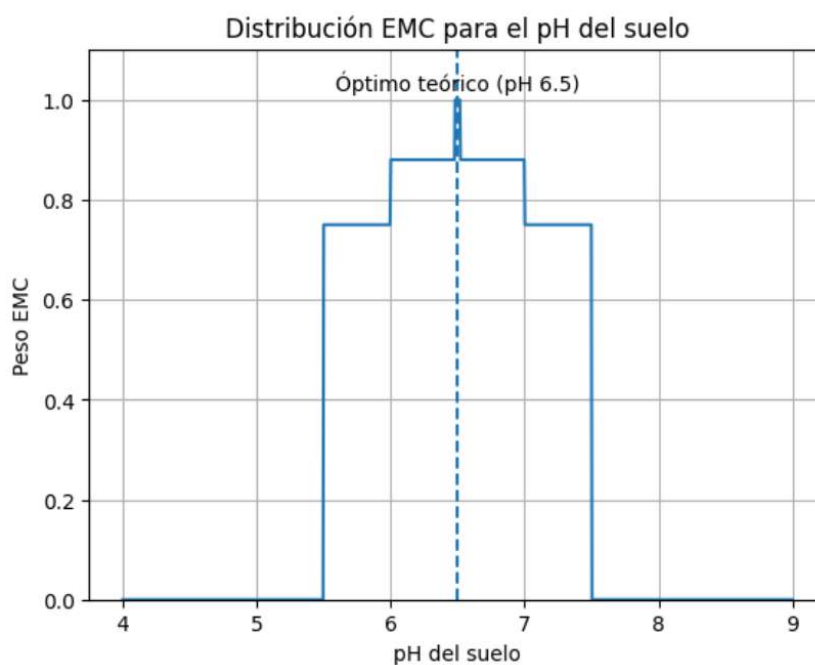
Clasificación EMC de la variable pH del suelo para el maíz NB-6

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
PH del suelo	S_t	6.5	No aplica	1.00
	S_1	6.0 – 7.0	Neutro	0.88
	S_2	5.5 – 5.9	Acidez	0.75
	S_2	7.1 – 7.5	Alcalinidad	0.75
	N	< 5.5 o > 7.5	Toxicidad/Déficit	0.00

Nota: Elaboración propia.

Figura 10

Distribución EMC de la variable pH del suelo para el maíz NB-6



Nota: Elaboración propia.

2. Materia Orgánica

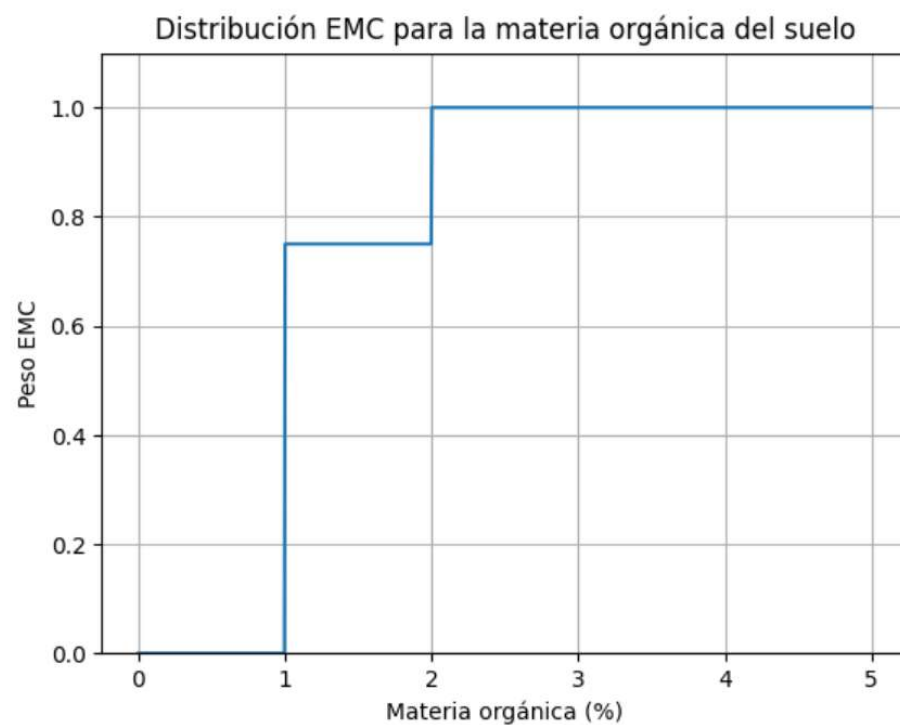
Tabla 9

Clasificación EMC de la variable materia orgánica para el maíz NB-6

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
Materia orgánica	S_1	≥ 2.0	Alta fertilidad	1
	S_2	1.0 – 2.0	Fertilidad	0.75
	N	< 1.0	Esterilidad	0.00

Figura 11

Distribución EMC de la variable materia orgánica para el maíz NB-6



Nota: Elaboración propia.

3. Pendiente

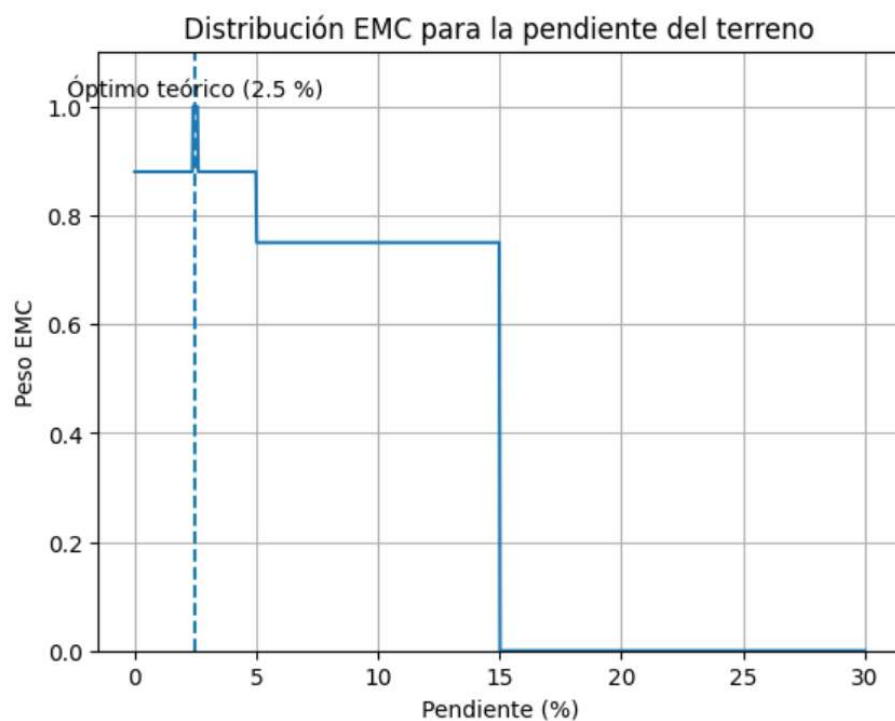
Tabla 10

Clasificación EMC de la variable pendiente para el maíz NB-6.

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
Pendiente	S_t	2.5	No aplica	1.00
	S_1	0 – 5	Superficial/plana	0.88
	S_2	5 – 15	Erosión	0.75
	N	> 15	Topografía/Moderada	0.00

Figura 12

Distribución EMC de la variable pendiente para el maíz NB-6.



Nota: Elaboración propia.

4. Profundidad efectiva

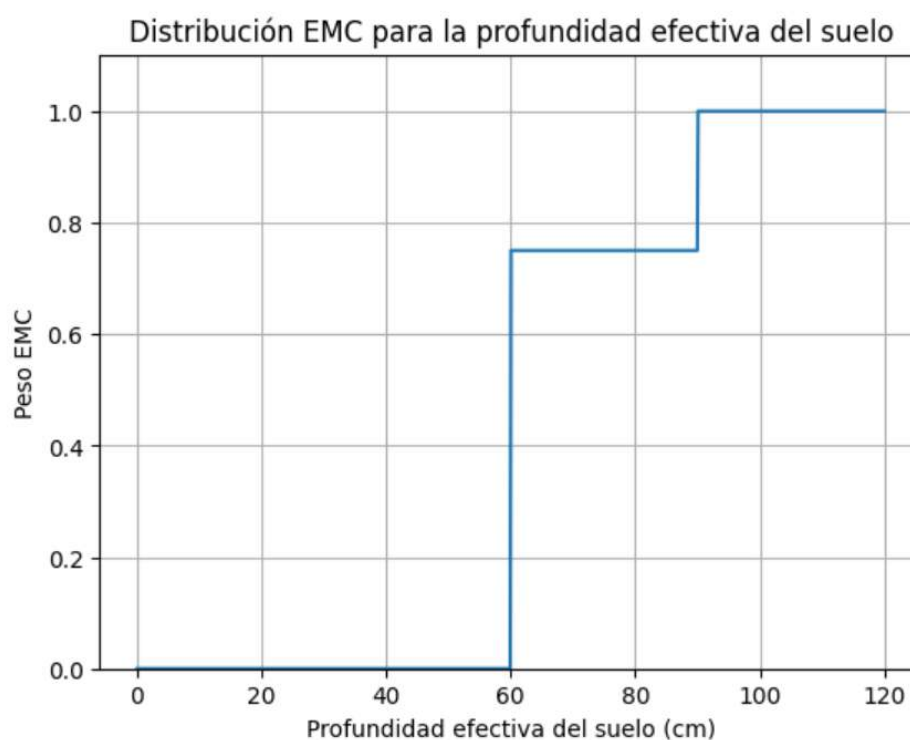
Tabla 11

Clasificación EMC de la variable profundidad efectiva para el maíz NB-6.

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
Profundidad Efectiva (cm)	S_1	≥ 90	Enraizamiento óptimo	1
	S_2	60 – 90	Suelo físico	0.75
	N	< 60	Enraizamiento limitado / Restricción	0.00

Figura 13

Distribución EMC de la variable profundidad efectiva para el maíz NB-6.



Nota: Elaboración propia.

5. Temperatura Media Diaria

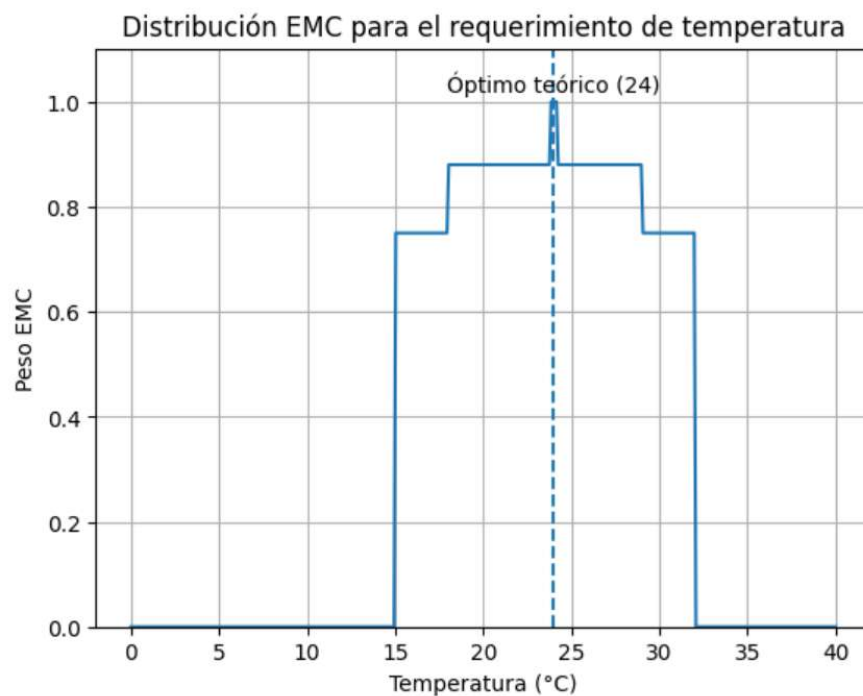
Tabla 12

Clasificación EMC de la variable Temperatura para el maíz NB-6.

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
Temperatura media diaria (°C)	S_t	24	No aplica	1.00
	S_1	18 – 30	Clima adecuado	0.88
	S_2	15 – 18 y 29 - 32	Riesgo de marchitarse	0.75
	N	< 15 o > 32	Pérdida de cosecha	0.00

Figura 14

Distribución EMC de la variable temperatura para el maíz NB-6.



Nota: Elaboración propia.

6. Precipitación por ciclo productivo total

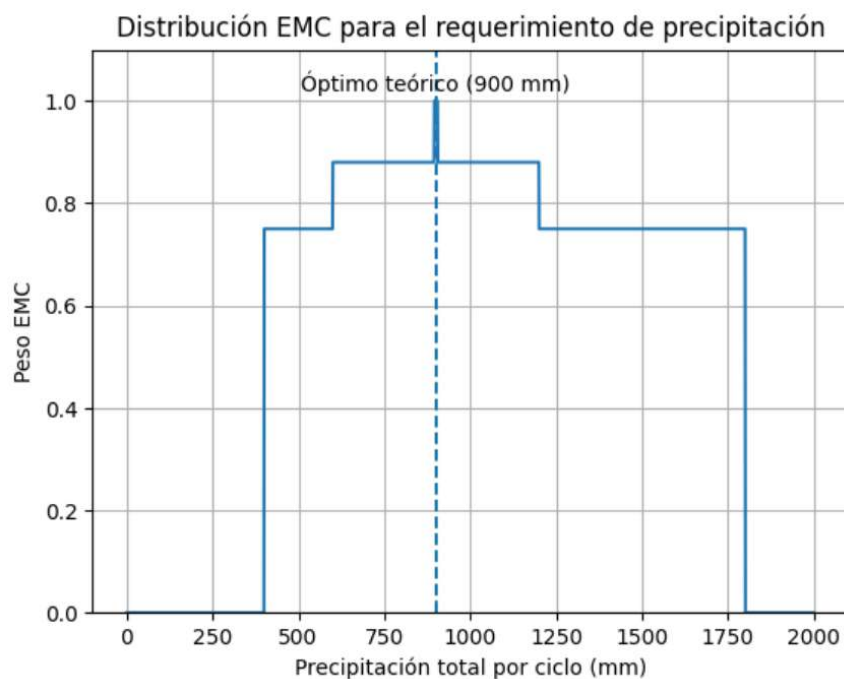
Tabla 13

Clasificación EMC de la variable precipitación para el maíz NB-6.

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
Precipitación por ciclo productivo total (mm)	S_t	900	No aplica	1.00
	S_1	600 – 1200	Agua suficiente	0.88
	S_2	400 – 600 o 1200 – 1800	Mantener un manejo de agua nivelado	0.75
	N	< 400 o > 1800	Estrés hídrico / Encharcamiento	0.00

Figura 15

Distribución EMC de la variable precipitación para el maíz NB-6.



Nota: Elaboración propia.

7. Humedad Relativa

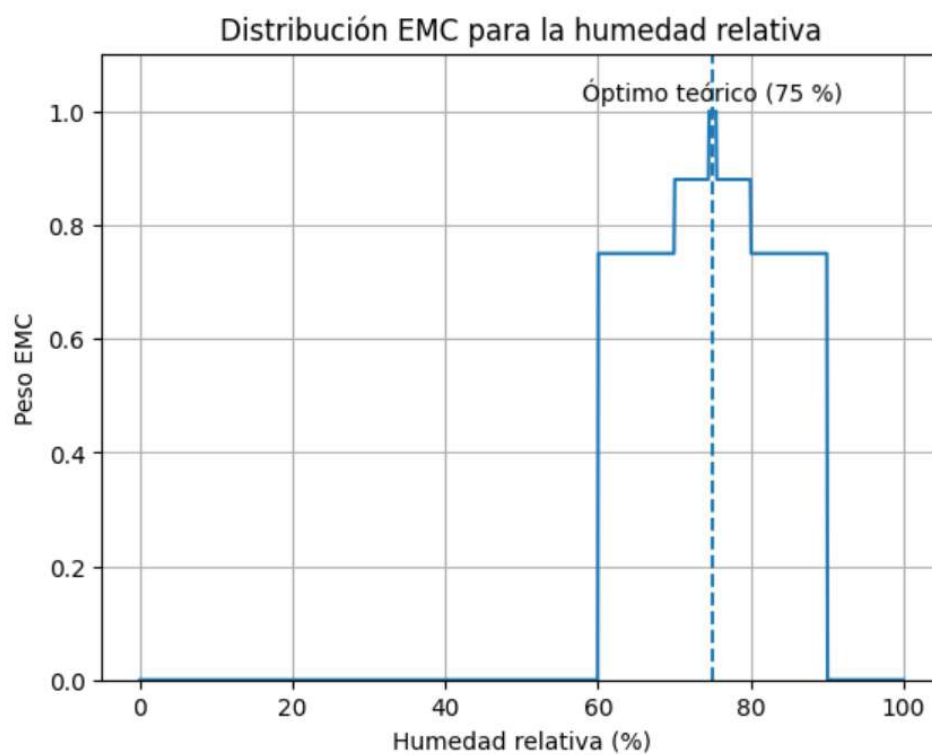
Tabla 14

Clasificación EMC de la variable humedad relativa para el maíz NB-6.

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
Humedad relativa (%)	S_t	75	No aplica	1.00
	S_1	70 – 80	Humedad adecuada	0.88
	S_2	60 – 70 o 80 – 90	Riesgo de estrés hídrico o enfermedades	0.75
	N	< 60 o > 90	Sequía o exceso de humedad, bajo rendimiento	0.00

Figura 16

Distribución EMC de la variable humedad relativa para el maíz NB-6.



Nota: Elaboración propia.

8. Elevación

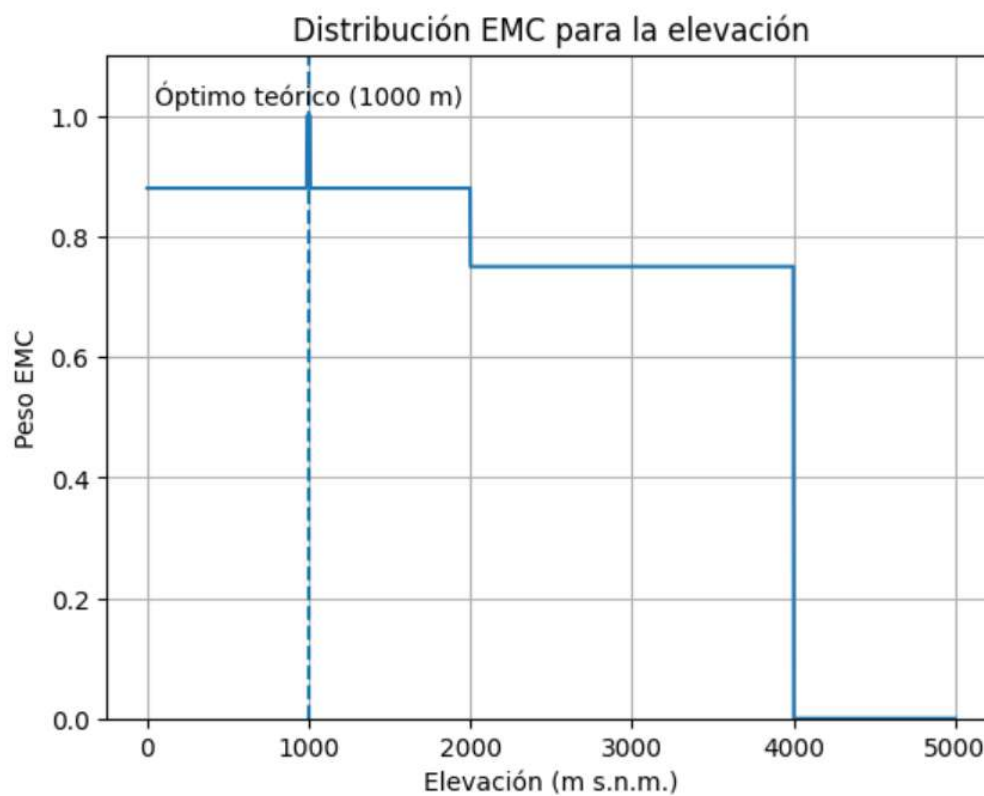
Tabla 15

Clasificación EMC de la variable elevación para el maíz NB-6.

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
Elevación (m.s.n.m.)	S_t	1000	No aplica	1.00
	S_1	0 – 2000	Elevación óptima	0.88
	S_2	2000 – 4000	Rendimiento reducido	0.75
	N	> 4000	Estrés por temperatura / falta de oxígeno	0.00

Figura 17

Distribución EMC de la variable elevación para el maíz NB-6.



Nota: Elaboración propia.

9. Capacidad de Retención

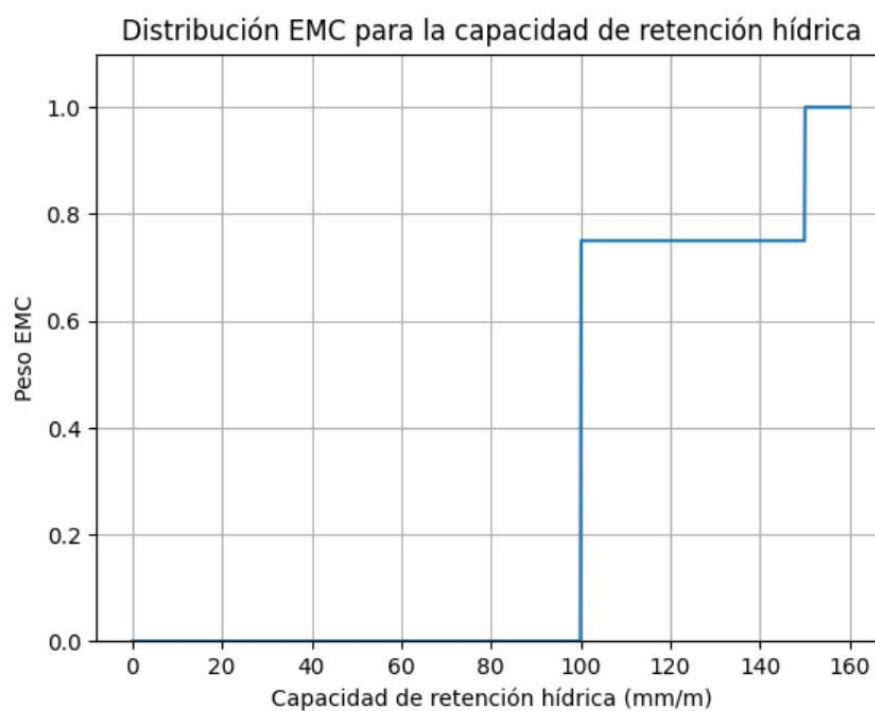
Tabla 16

Clasificación EMC de la variable capacidad de retención para el maíz NB-6.

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
Capacidad de retención (CRH)	S_1	Alta (150 mm/m)	Alta disponibilidad de agua	1
	S_2	Media (≥ 100 o <150 mm/m)	Humedad	0.75
	N	Baja (100mm/m <)	Sequía	0.00

Figura 18

Distribución EMC de la variable capacidad de retención para el maíz NB-6.



Nota: Elaboración propia.

10.Drenaje

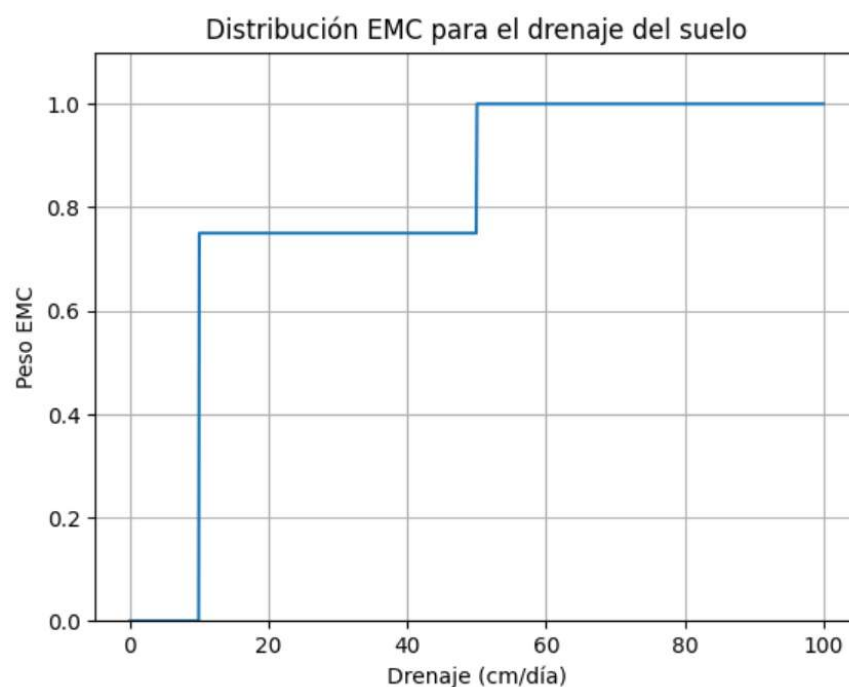
Tabla 17

Clasificación EMC de la variable capacidad de retención para el maíz NB-6.

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
Drenaje	S_1	Óptimo (≥ 50 cm/día)	Retención suficiente y buen drenaje	1
	S_2	Moderado (≥ 10 y < 50 cm/día)	Oxigenación	0.75
	N	Pobre (< 10 cm/día)	Exceso de agua	0.00

Figura 19

Distribución EMC de la variable drenaje para el maíz NB-6.



Nota: Elaboración propia.

11. Textura Del Suelo

Tabla 18

Clasificación EMC de la variable textura para el maíz NB-6.

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
Textura del suelo	S_1	Franco, Franco limoso, Franco, Franco limoso, Franco Arcilloso	Suelo favorable	1
	S_2	Franco arenoso, Arcillo arenoso	Requiere riego frecuente	0.75
	S_2	Arcilloso	Riesgo de encharcamiento, drenaje deficiente	0.75
	N	Arenoso / muy arenoso / Arenoso franco / Limoso / Franco arcillo arenoso / Franco arcillo limoso/ Arcillo limoso	Suelo sin retención de agua y poca fertilidad	0.00

12. Radiación Solar

Tabla 19

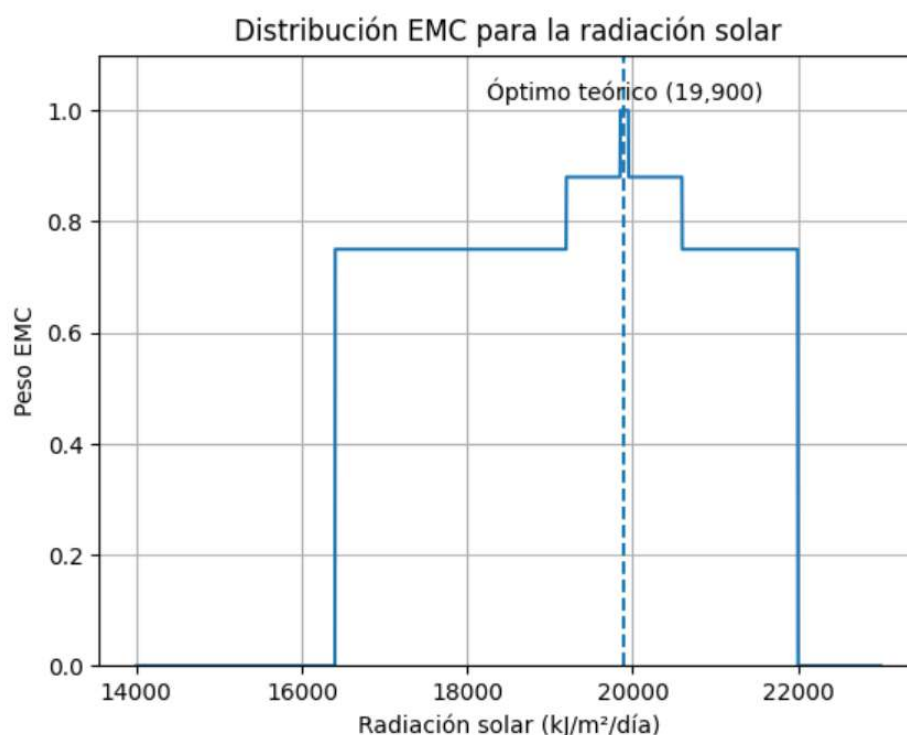
Clasificación EMC de la variable radiación solar para el maíz NB-6.

Variable	Clase	Rango / Valor	Subclase (Limitante)	Valor EMC
Radiación solar (KJ/m²/día)	S_t	Óptimo (19,900 kJ/m ² /día))	No aplica	1
	S_1	Alta (19,200 - 20,600 kJ/m ² /día))	Fotosíntesis y crecimiento óptimo	0.88
	S_2	Moderada (16,400-19,200 kJ/m ² /día) y Muy Alta ($\geq 20,600$ kJ/m ² /día)	Rendimiento moderado. Puede generar estrés de calor en Muy Alta.	0.75

	<i>N</i>	Muy bajo (< 16,400) y extremadamente alto ($\geq 22,000$ kJ/m ² /día)	Difícil crecimiento	0.00
--	----------	---	---------------------	------

Figura 20

Distribución EMC de la variable radiación solar para el maíz NB-6.



Nota: Elaboración propia.

Parte 2: Evaluar las variables críticas utilizando algoritmos inteligentes

La evaluación se desarrolló a partir de una base de datos compuesta por 63 municipios de Nicaragua, provista por CENAGRO a través de los informes del Censo Nacional Agropecuario. Esta información contiene datos a nivel municipal del rendimiento del cultivo de maíz (variedad NB-6) y otros cultivos, correspondientes a la época de siembra de primera. Los datos disponibles por el Censo se encuentran en el Anexo 3.

Para el análisis se empleó la clasificación de zonas climáticas y edafológicas previamente definida en las secciones anteriores, con el fin de garantizar coherencia espacial y agroecológica en la interpretación de los resultados.

Es importante destacar que el concepto de criticidad asignado a cada variable climática o edáfica no persigue establecer un criterio de exclusión, sino identificar aquellas variables fundamentales que no pueden estar ausentes para el desarrollo óptimo del cultivo. En este sentido, la criticidad se define como una medida de influencia relativa de las variables agroambientales dentro del sistema de producción del cultivo, estimada mediante modelos inteligentes. A su vez es importante señalar que este procedimiento se emplea exclusivamente para la determinación de la criticidad de las variables, sin fines predictivos del rendimiento agrícola, constituyendo únicamente la base de ponderación del modelo de idoneidad.

El conjunto de datos final estuvo conformado por 63 observaciones y 12 variables predictoras, donde la variable dependiente u objetivo corresponde al rendimiento (unidad de almacenamiento/área) del cultivo, expresado en quintales por manzana (qq/mz) a nivel municipal.

Previo al modelado, fue necesario obtener para cada una de las variables sus valores representativos por municipio. Para ello, se utilizó un shapefile de límites municipales de Nicaragua, sobre el cual se aplicaron técnicas de análisis estadístico zonal a partir de capas raster temáticas. Este procedimiento permitió calcular un valor agregado por municipio para cada variable climática, edáfica y topográfica.

A continuación, se describe el método empleado para el cálculo zonal de cada variable:

- Precipitación: La precipitación fue calculada a partir de datos mensuales basados en la normal climática histórica. Se realizó la sumatoria de los meses correspondientes a la época de siembra de primera (mayo a agosto), obteniéndose como resultado la precipitación acumulada del ciclo productivo.

- Temperatura y humedad relativa: Para ambas variables se utilizó la media aritmética de los valores mensuales correspondientes al período de estudio.
- Variables edáficas y topográficas: El pH del suelo, materia orgánica, radiación solar, elevación, pendiente, profundidad efectiva del suelo y drenaje fueron calculados mediante el valor promedio zonal por municipio, utilizando las capas raster correspondientes.
- Textura del suelo y capacidad de retención de agua: Dado que estas variables poseen una naturaleza clasificatoria, su representación raster corresponde a clases discretas. En estos casos, el valor municipal se obtuvo mediante la moda zonal, seleccionando la clase más frecuente dentro de cada municipio, a partir de sus valores FLE.

Este procedimiento permitió consolidar una base de datos espacialmente homogénea y consistente, adecuada para el análisis estadístico y el posterior entrenamiento de modelos de aprendizaje automático orientados a la determinación de la criticidad de las variables agroambientales.

Se realizaron múltiples pruebas utilizando distintos modelos inteligentes, con el objetivo de evaluar su capacidad para describir la relación entre variables agroambientales y el rendimiento del cultivo. Para la aceptación de los modelos se establecieron los siguientes criterios de evaluación:

Coeficiente de determinación (R^2) mayor a 0, indicando que el modelo presenta una capacidad predictiva superior a la media del conjunto de datos.

“El modelo presenta un desempeño superior al de un modelo base (baseline), lo que indica que es capaz de capturar parte de la estructura de variabilidad del sistema agroambiental. Este criterio se utiliza únicamente como validación de consistencia del modelo, sin que su finalidad sea la predicción del rendimiento agrícola.

Raíz del Error Cuadrático Medio ($RMSE$), utilizada como medida de la magnitud del error de predicción en las unidades originales del rendimiento.

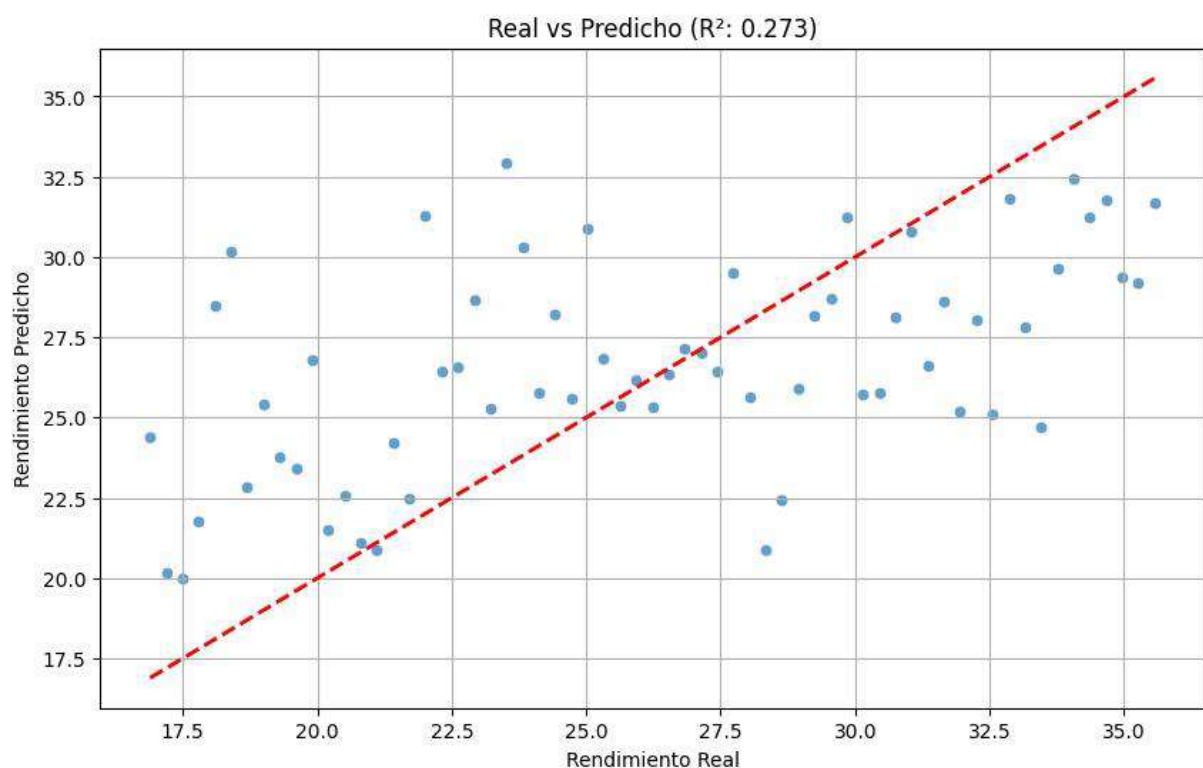
Cabe destacar que la criticidad de las variables se obtiene mediante un consenso entre diferentes modelos de regresión de aprendizaje automático, lo que permite una estimación más robusta y estable de la influencia relativa de cada variable, utilizada exclusivamente para la construcción del modelo de idoneidad agrícola.

Se evaluó el algoritmo Random Forest Regressor y Elastic Net, configurado con 300 árboles (estimadores). Este modelo presentó un $RMSE$ de 4.53 y un R^2 de 0.3135 permiten caracterizar la relación entre variables.

El código de programación utilizado se puede encontrar en Anexo 5.

Figura 21

Rendimiento real vs predicho para el maíz NB-6.



Nota: Elaboración propia.

La finalidad del uso de modelos de aprendizaje automático en esta investigación no es la predicción exacta del rendimiento, sino la identificación de la influencia relativa de

las variables climáticas y edáficas que intervienen en la idoneidad del cultivo. Con esto en visto se obtuvieron los siguientes pesos de criticidad.

Tabla 20

Criticidad de variables edafoclimáticas para el maíz NB-6.

Nº	Variable	Importancia
1	Materia orgánica	0.2020
2	Temperatura media	0.1713
3	Precipitación	0.1427
4	Humedad relativa	0.1087
5	Pendiente	0.1028
6	Profundidad efectiva	0.0987
7	pH del suelo	0.0770
8	Drenaje del suelo	0.0530
9	Elevación	0.0398
10	Textura	0.0032
11	Capacidad de retención hídrica	0.0003
12	Radiación Solar	0.0000

Nota: Elaboración propia.

La materia orgánica del suelo presenta la mayor importancia relativa dentro del modelo, lo que confirma su rol fundamental en la productividad del cultivo. Las variables climáticas asociadas a la disponibilidad de agua, como la precipitación acumulada y la humedad relativa, muestran una influencia significativa, mientras que las variables topográficas y edáficas presentan una contribución intermedia. La capacidad de retención hídrica y la radiación solar, en la forma actual de representación, no evidencia impacto significativo sobre el rendimiento modelado. Cabe mencionar que con estos datos nuestra unidad de error es bastante aceptable, por lo tanto, no fue necesario buscar más datos para la evaluación y añadiendo el factor tiempo.

El código de programación empleado para determinar la importancia de las variables en relación con los coeficientes del algoritmo de aprendizaje se encuentra disponible en el Anexo 5 y un ejemplo aplicado al frijol Inta rojo en el Anexo 6.

Parte 3: Desarrollar el modelo de idoneidad de cultivos

El modelo de idoneidad agrícola propuesto se fundamenta en la integración ponderada de múltiples variables agroambientales, considerando tanto su grado de idoneidad individual como su criticidad relativa dentro del sistema productivo.

En este enfoque, la idoneidad global (I) de una unidad espacial se define como la combinación de las idoneidades parciales de cada variable, multiplicadas por su respectivo peso o criticidad. Matemáticamente, el modelo se expresa como:

$$I = \sum_{i=1}^n (S_i \times w_i)$$

Donde:

I es la idoneidad agrícola global del cultivo.

S_i representa la idoneidad de la variable i .

w_i corresponde a la criticidad o peso relativo de la variable i .

n Es el número total de variables consideradas en el modelo.

1. Normalización de las variables

Los valores originales de cada variable agroambiental fueron transformados a una escala adimensional entre 0 y 1, con el fin de permitir su comparación e integración dentro del modelo. Este proceso de normalización se realizó mediante:

- Clases FLE (Factores Limitantes Edafoclimáticos)
- Esquema EMC (Evaluación Multicriterio)

En este esquema:

- Un valor de 0 representa condiciones no aptas para el cultivo.
- Un valor de 1 representa condiciones óptimas.
- Valores intermedios indican distintos niveles de aptitud relativa.

De esta forma, cada variable aporta al modelo únicamente en función de su grado de adecuación agroecológica, independientemente de su unidad de medida original.

2. Concepto de criticidad

La criticidad (w_i) expresa la importancia relativa de cada variable dentro del sistema productivo del cultivo. Estos pesos fueron obtenidos a partir del análisis de aprendizaje automático, específicamente mediante el modelo Random Forest, el cual permitió identificar la influencia relativa de cada variable sobre el rendimiento agrícola.

Este enfoque permite:

- Reducir la subjetividad en la asignación de pesos.
- Fundamentar el modelo de idoneidad en evidencia empírica.
- Integrar el comportamiento histórico del rendimiento con criterios agroecológicos.

3. Idoneidad Máxima Teórica

Si partimos de la formula anterior donde $S_i \in [0, 1]$, entonces el escenario ideal u óptimo ocurre cuando: $S_i = 1 \forall i$, por tanto, la idoneidad máxima teórica queda definida como:

$$I = \sum_{i=1}^n w_i$$

Esto hace posible obtener un índice de idoneidad comparable y adimensional. Que a su vez define una clasificación por clases de idoneidad:

Tabla 21

Clasificación de FLE para el modelo de idoneidad para el maíz NB-6.

Clase	Rango I	Interpretación
S_1	0.80 – 1.00	Muy alta idoneidad
S_2	0.60 – 0.80	Idoneidad moderada
S_3	0.40 – 0.60	Idoneidad marginal
N	< 0.40	No apto

Nota: Elaboración propia.

4. Condiciones limitantes

En el modelo de idoneidad se distinguieron variables de tipo limitante y variables de tipo modulador. Las variables limitantes fueron tratadas como restricciones absolutas, asignando una idoneidad nula cuando sus valores exceden umbrales críticos que imposibilitan el desarrollo del cultivo. Las variables restantes fueron integradas mediante una combinación ponderada, permitiendo una evaluación gradual de la idoneidad agrícola.

Variables que limitan son las siguientes: pH (toxicidad), profundidad efectiva del suelo (suelo muy somero), drenaje (encharcamiento, asfixia radicular) y pendiente (erosión e imposibilidad de manejo). Por su parte las demás variables no llevan este comportamiento.

Modelo final:

$$R_j = \begin{cases} 0, & \text{si alguna variable limitante falla} \\ 1, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Finalmente, el modelo se representa de la siguiente manera:

$$I_j = R_j \times \frac{\sum_{i=1}^n (S_i \times w_i)}{I_{max}}$$

Otro punto importante en tomar en consideración es el conjunto de datos adquiridos de plantaciones o lugares donde se cultiven dicho cultivo ya que esto limita los promedios y moda de la zona ya que nuestros mapas ráster son por coordenadas y no por municipio. Esto no significa que nuestros datos se alejen mucho de los valores reales, lo que se obtiene es un acercamiento.

9. Conclusiones

La caracterización edafológica y climática del territorio nicaragüense permitió establecer un diagnóstico integral de las condiciones ambientales que influyen en el potencial productivo del suelo, evidenciando una marcada variabilidad espacial de las propiedades edáficas y climáticas a nivel nacional. Mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), fue posible integrar y analizar de forma espacial variables clave como textura, profundidad efectiva, pH, materia orgánica, pendiente, precipitación, temperatura y elevación, generando insumos técnicos confiables para la identificación de áreas con diferente capacidad de uso agrícola.

La descripción de los requerimientos edafológicos y climáticos del cultivo de maíz, específicamente de la variedad NB-6, permitió definir de manera precisa las condiciones óptimas, moderadas y limitantes para su desarrollo en el contexto nicaragüense. A partir del Marco de Evaluación de Tierras de la FAO (FLE), se establecieron rangos técnicos estandarizados para variables clave del suelo y del clima, asegurando la correspondencia entre las necesidades fisiológicas del cultivo y las características ambientales del territorio. Este proceso de estandarización constituyó un insumo esencial para la evaluación objetiva de la aptitud agrícola, facilitando la integración de los requerimientos del cultivo en el análisis multicriterio

El desarrollo del modelo inteligente híbrido de evaluación de idoneidad agrícola, basado en la integración del Marco de Evaluación de Tierras de la FAO, la Evaluación Multicriterio (EMC) y técnicas de inteligencia artificial, permitió evaluar de manera objetiva la aptitud de cultivos en el territorio nicaragüense. La transformación de las clases de aptitud FAO (S_1 , S_2 y N) en valores numéricos estandarizados facilitó su incorporación al modelo multicriterio y su análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). Asimismo, la implementación y evaluación del algoritmo Random Forest Regressor permitió modelar relaciones no lineales entre las variables edafoclimáticas y la idoneidad agrícola, fortaleciendo la precisión y capacidad predictiva del modelo. En conjunto, el modelo híbrido EMC–IA desarrollado constituye una herramienta eficaz de apoyo a la toma de decisiones en la planificación agrícola.

10. Recomendaciones

Se recomienda aplicar el modelo inteligente de evaluación de idoneidad agrícola a otros cultivos de relevancia económica y alimentaria en Nicaragua, con el fin de validar su adaptabilidad, robustez y capacidad de generalización en distintos contextos productivos. La extensión del modelo a diversos sistemas de cultivo fortalecería su utilidad como herramienta de planificación agrícola a escala nacional, facilitando la identificación de áreas con mayor potencial productivo y promoviendo un uso más eficiente y sostenible de los recursos suelo-clima, así como la diversificación productiva basada en evidencia técnica y espacial.

Para futuras investigaciones, se sugiere complementar el modelo mediante la incorporación de variables socioeconómicas, de acceso a infraestructura y prácticas de manejo agrícola, así como fomentar su implementación como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en instituciones vinculadas a la planificación agrícola y al ordenamiento territorial. La integración de estos factores permitiría aproximar el análisis de idoneidad a las condiciones reales de los productores y tomadores de decisión, fortaleciendo la pertinencia, aplicabilidad y alcance institucional del modelo desarrollado.

Adicionalmente, se recomienda que, para su implementación futura, el modelo incorpore criterios de zonificación territorial mediante filtros espaciales que delimiten áreas cultivables, zonas urbanas, habitacionales y áreas de reserva. La integración de mapas de uso del suelo, junto con el aumento en la cantidad de los datos de entrada, contribuiría a mejorar la coherencia espacial, precisión y capacidad predictiva del modelo, favoreciendo la generación de escenarios de planificación agrícola más robustos y acordes con la dinámica territorial del país.

11. Referencias Bibliográficas

- Breiman, L. (2001). *Random forests*. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chavarría, C. (2007). *Manual práctico de riego y drenaje*. Matagalpa.
- Eastman, J. R. (2006). *Decision support: Multi-criteria evaluation and decision support*. Clark University, Clark Labs.
- ESRI. (2025). *Diccionario SIG*. <https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/suitability-model>
- FAO. (1976). *A framework for land evaluation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (1996). *Agroecological zoning guidelines*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2021). *FAO GeoNetwork*. <http://www.fao.org/geonetwork>
- FAO. (2025). *Geospatial information for sustainable food systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/geospatial/en/>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). *WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas*. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- GADM. (2025). *GADM database of global administrative areas: Download country data*. https://gadm.org/download_country.html
- Galán, J. S. (2021, 1 de enero). *Agricultura convencional*. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/agricultura-convencional.html>
- Hann, J. (1902). *The New International Encyclopædia*.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2nd ed.). Springer.
- Haykin, S. (1999). *Neural networks: A comprehensive foundation*. Prentice Hall.
- Hernández, D. R. (2018). *Glosario informático*. Universidad de Guadalajara.

Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 186. Springer-Verlag.

IBM. (2023, 20 de noviembre). *Geographic information system (GIS)*. <https://www.ibm.com/es-es/think/topics/geographic-information-system>

IICA. (2014). *Manual de agricultura de precisión*. PROCISUR.

Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE/INEC). (2021). *Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2021*. Managua, Nicaragua. <https://www.inec.gob.ni/>

INETER. (s.f.). *Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales*. <https://www.ineter.gob.ni>

INETER. (2014). *Tercera comunicación nacional sobre cambio climático de Nicaragua*. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.

Levitt, J. (1980). *Responses of plants to environmental stresses*. Academic Press.

Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons.

Morales, I. C. (2011). *Edafología 1*. Espacio Gráfico Comunicaciones S.A.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2024). *FAOSTAT: Base de datos de producción agrícola y área cosechada*. Recuperado el [día mes año], de <https://www.fao.org/faostat/es/#home>

Physics, M. (2025). *Análisis del estrés en cultivos: Detección, manejo e impacto en rendimiento*. Modern Physics. <https://modern-physics.org/analisis-del-estres-en-cultivos-deteccion-manejo-e-impacto-en-rendimiento/>

Russell, S. J., & Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill.

Saaty, T. L. (2008). *Decision making with the analytic hierarchy process*. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>

Simons, G. W. H., Koster, R., & Droogers, P. (2020). *HiHydroSoil v2.0: Global maps of soil hydraulic properties at 250 m resolution* (FutureWater Report 213). FutureWater. <https://www.futurewater.es/projects/hihydrosoil-v2-0-global-maps-of-soil-hydraulic-properties-at-250m-resolution-es/>

Zou, H., & Hastie, T. (2005). Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 67(2), 301–320. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x>

12. Anexos

Anexo 1

Clasificación textural del suelo según porcentajes de arena, limo y arcilla (USDA)

Clase textural	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Arenoso	85 – 100	0 – 15	0 – 10
Arenoso franco	70 – 90	0 – 30	0 – 15
Franco arenoso	43 – 85	0 – 50	0 – 20
Franco	23 – 52	28 – 50	7 – 27
Franco limoso	0 – 50	50 – 88	0 – 27
Limoso	0 – 20	80 – 100	0 – 12
Franco arcillo arenoso	45 – 65	0 – 28	20 – 35
Franco arcilloso	20 – 45	15 – 53	27 – 40
Franco arcillo limoso	0 – 20	40 – 73	27 – 40
Arcillo arenoso	45 – 65	0 – 20	35 – 55
Arcilloso	0 – 45	0 – 40	40 – 100
Arcillo limoso	0 – 20	40 – 60	40 – 60

Nota: Elaboración propia.

Anexo 2

Requerimientos del suelo del cultivo Maíz N-B6

Variable	Rango	Adecuación	Comentario
Textura del suelo	Franco, Franco limoso, Franco, Franco limoso, Franco Arcilloso	Favorable	Mejor equilibrio de aireación y retención de agua
	Franco arenoso, Arcillo arenoso	Moderado	Puede secarse rápido, requiere riego frecuente
	Arenoso / muy arenoso / Arenoso franco / Limoso / Franco arcillo arenoso / Franco arcillo limoso/ Arcillo limoso	No favorable	Baja retención de agua, poco fértil
	Arcilloso	Moderado	Riesgo de encharcamiento, drenaje deficiente
pH del suelo	6.0 – 7.0	Óptimo	Nutrientes disponibles

	5.5 – 6.0	Aceptable	Menor disponibilidad de nutrientes
	7.0 – 7.5	Aceptable	Puede limitar micronutrientes
	< 5.5 o > 7.5	No favorable	Crecimiento limitado, riesgo de deficiencia/nutrición
Materia orgánica (%)	≥ 2.0	Bueno a muy bueno	Fertilidad y retención de agua óptima
	1.0 – 2.0	Aceptable	Menor disponibilidad de nutrientes
	< 1.0	Bajo	Necesita fertilización adicional
Pendiente (%)	0 – 5	Muy favorable	Fácil manejo, baja erosión
	5 – 15	Moderada	Riesgo de erosión moderado
	> 15	Riesgo alto	Difícil manejo, alta erosión
Capacidad de retención de agua (CRH, mm/m)	Alta (150 mm/m)	Mantiene disponibilidad de agua	Ideal para crecimiento
	Media (<150 mm/m)	Aceptable	Riesgo moderado de estrés hídrico
	Media (≥ 100 mm/m)	Aceptable	Requiere riego
	Baja (<100mm/m)	Estrés hídrico	Requiere riego o manejo especial
Drenaje (cm/día)	Óptimo (≥ 50 cm/día)	Suelo aireado	Evita anoxia radicular, es óptimo
	Moderado (< 50 cm/día)	Bastante aceptables rangos cercanos a 50	Buen drenaje
	Moderado (≥ 10 cm/día)	Aceptable	Se requiere surcos o drenaje
	Pobre (<10 cm/día)	Mal para maíz	Riesgo de raíces asfixiadas
Profundidad efectiva del suelo (cm)	≥ 90	Excelente	Desarrollo completo de raíces
	60 – 90	Aceptable	Limitación parcial del crecimiento
	< 60	Poco favorable	Raíces no alcanzan buen desarrollo

Nota: Elaboración propia.

Requerimientos del suelo del cultivo Frijol INTA Rojo

Variable	Rango	Adecuación	Comentario
Textura del suelo	Franco, Franco limoso, Franco - arenoso	Favorable	Mejor equilibrio de aireación y retención de agua
	Franco arcilloso	Moderado	Puede secarse rápido, requiere riego frecuente
	Arenoso / muy arenoso / Arenoso franco / Limoso / Franco arcillo arenoso / Franco arcillo limoso/ Arcillo limoso / Arcilloso	No favorable	Déficit hídrico, encharcamiento
pH del suelo	6.0 – 7.5	Óptimo	Nutrientes disponibles
	4.5 – 8.2	Aceptable	Menor disponibilidad de nutrientes
	< 4.5 o > 8.2	No favorable	Puede limitar micronutrientes Crecimiento limitado, riesgo de deficiencia/nutrición
Materia orgánica (%)	≥ 1.5	Bueno a muy bueno	Fertilidad y retención de agua óptima
	1.0	Aceptable	Menor disponibilidad de nutrientes
	< 1.0	Bajo	Necesita fertilización adicional
Pendiente (%)	0 – 8	Muy favorable	Fácil manejo, baja erosión
	8 – 15	Moderada	Riesgo de erosión moderado
	> 15	Riesgo alto	Difícil manejo, alta erosión
Capacidad de retención de agua (CRH, mm/m)	Alta (150 mm/m)	Mantiene disponibilidad de agua	Ideal para crecimiento
	Media (100 - 150 mm/m)	Aceptable	Retención moderada
	Baja (<100mm/m)	Estrés hídrico	Requiere riego o manejo especial
Drenaje (cm/día)	Óptimo (>= 50 cm/día)	Suelo aireado	Evita anoxia radicular, es óptimo
	Moderado (50 - 10 cm/día)	Bastante aceptables	Buen drenaje Se requiere surcos o drenaje

	Pobre (<10 cm/día)	Mal para maíz	Riesgo de raíces asfixiadas
Profundidad efectiva del suelo (cm)	≥ 100	Excelente	Desarrollo completo de raíces
	50 – 100	Aceptable	Limitación parcial del crecimiento
	< 25	Poco favorable	Raíces no alcanzan buen desarrollo

Nota: Elaboración propia.

Requerimientos climáticos del cultivo Maíz N-B6 y Frijol INTA Rojo

Variable	Rango	Adecuación	Comentario
Temperatura media diaria (°C)	18 – 30	Favorable	Temperatura óptima para crecimiento y fotosíntesis
	15 – 18	Aceptable	Crecimiento más lento, menor eficiencia fotosintética
	< 15 o > 32	No favorable	Estrés por frío o calor, germinación y desarrollo limitados
Precipitación por ciclo productivo total (mm)	600 – 1200	Favorable	Agua suficiente para desarrollo normal
	400 – 600 o 1200 – 1800	Aceptable	Crecimiento moderado, riego o manejo del agua recomendable
	< 400 o > 1800	No favorable	Estrés hídrico o encharcamiento, rendimiento reducido
Humedad relativa (%)	70 – 80	Favorable	Humedad adecuada para transpiración y desarrollo óptimo
	60 – 70 o 80 – 90	Aceptable	Riesgo moderado de estrés hídrico o enfermedades
	< 60 o > 90	No favorable	Estrés por sequía o exceso de humedad, posible impacto en rendimiento
Radiación solar (MJ/m²/día)	Alta (19,200 -20,600 kJ/m²/día)	Favorable	Fotosíntesis eficiente y buen crecimiento
	Muy alta (≥20,600 kJ/m²/día)	Aceptable	Potencialmente bueno, riesgo de estrés de calor.
	Moderada (16,400-19,200 kJ/m²/día)	Aceptable	Crecimiento limitado por menor radiación

	Muy bajo (< 16,400) y extremadamente alto ($\geq 22,000$ kJ/m ² /día)	No favorable	Producción reducida, desarrollo comprometido
Elevación (m.s.n.m.)	0 – 2000	Favorable	Adaptación óptima al rango de altitudes comunes para maíz en Nicaragua
	2000 – 4000	Aceptable	Adaptación posible, pero rendimiento puede reducirse
	> 4000	No favorable	Difícil cultivo, estrés por temperatura y menor oxígeno

Nota: Elaboración propia.

Requerimientos del clima del cultivo Frijol INTA Rojo

Variable	Rango	Adecuación	Comentario
Temperatura media diaria (°C)	18 – 27	Favorable	Temperatura óptima para crecimiento y fotosíntesis
	15 – 18	Aceptable	Crecimiento más lento, menor eficiencia fotosintética
	< 15 o > 30	No favorable	Estrés por frío o calor, germinación y desarrollo limitados
Precipitación por ciclo productivo total (mm)	1000 – 1600	Favorable	Agua suficiente para desarrollo normal
	500 – 1000	Aceptable	Crecimiento moderado, riego o manejo del agua recomendable
	< 400 o > 1600	No favorable	Estrés hídrico o encharcamiento, rendimiento reducido
Humedad relativa (%)	60 – 75	Favorable	Humedad adecuada para transpiración y desarrollo óptimo
	50 – 60 o 75 – 80	Aceptable	Riesgo moderado de estrés hídrico o enfermedades
	< 45 o > 80	No favorable	Estrés por sequía o exceso de humedad, posible impacto en rendimiento
Radiación solar (MJ/m²/día)	Alta (18,200 -22,000 kJ/m ² /día)	Favorable	Fotosíntesis eficiente y buen crecimiento
	Moderada (15,000 – 18,000 kJ/m ² /día)	Aceptable	Potencialmente bueno, riesgo de estrés de calor.

	Baja (12,000-15,000 kJ/m ² /día)	Aceptable	Crecimiento limitado por menor radiación
	Muy bajo (< 12,000 kJ/m ² /día)	No favorable	Producción reducida, desarrollo comprometido
Elevación (m.s.n.m.)	50 – 800	Favorable	Adaptación óptima al rango de altitudes comunes para maíz en Nicaragua
	800 – 1200	Aceptable	Adaptación posible, pero rendimiento puede reducirse
	> 12000	No favorable	Difícil cultivo, estrés por temperatura y menor oxígeno

Anexo 3

Rendimiento del cultivo Maíz NB6 y Frijol INTA Rojo en los diferentes municipios de Nicaragua.

Departamento	Municipio	Cultivo	Variedad	Rendimiento	Unidad de medida
LEÓN	ACHUAPA	Maíz	NB6	24.421	QQ/MZ
CHONTALES	ACOYAPA	Maíz	NB6	18.999	QQ/MZ
RIVAS	BELEN	Maíz	NB6	19.601	QQ/MZ
BOACO	BOACO	Maíz	NB6	29.241	QQ/MZ
BOACO	CAMOAPA	Maíz	NB6	28.94	QQ/MZ
CHINANDEGA	CHINANDEGA	Maíz	NB6	25.928	QQ/MZ
MATAGALPA	CIUDAD DARIO	Maíz	NB6	31.35	QQ/MZ
CHONTALES	COMALAPA	Maíz	NB6	18.698	QQ/MZ
ESTELÍ	CONDEGA	Maíz	NB6	28.036	QQ/MZ
CARAZO	DIRIAMBÁ	Maíz	NB6	21.108	QQ/MZ
RÍO SAN JUAN	EL ALMENDRO	Maíz	NB6	22.915	QQ/MZ
RÍO SAN JUAN	EL CASTILLO	Maíz	NB6	23.819	QQ/MZ
JINOTEGA	EL CUA	Maíz	NB6	34.664	QQ/MZ
NUEVA SEGOVIA	EL JICARO	Maíz	NB6	30.145	QQ/MZ
RACCS	EL RAMA	Maíz	NB6	32.555	QQ/MZ
LEÓN	EL SAUCE	Maíz	NB6	25.024	QQ/MZ
RACCS	EL TORTUGUERO	Maíz	NB6	32.856	QQ/MZ

MATAGALPA	EL TUMA - LA DALIA	Maíz	NB6	31.953	QQ/MZ
CHINANDEGA	EL VIEJO	Maíz	NB6	26.831	QQ/MZ
ESTELÍ	ESTELI	Maíz	NB6	27.735	QQ/MZ
NUEVA SEGOVIA	JALAPA	Maíz	NB6	30.446	QQ/MZ
CARAZO	JINOTEPE	Maíz	NB6	20.505	QQ/MZ
CHONTALES	JUIGALPA	Maíz	NB6	17.794	QQ/MZ
RACCS	LA CRUZ DE RIO GRANDE	Maíz	NB6	33.158	QQ/MZ
CHONTALES	LA LIBERTAD	Maíz	NB6	18.095	QQ/MZ
LEÓN	LARREYNAGA	Maíz	NB6	25.325	QQ/MZ
LEÓN	LEÓN	Maíz	NB6	25.626	QQ/MZ
MASAYA	MASAYA	Maíz	NB6	17.493	QQ/MZ
MATAGALPA	MATAGALPA	Maíz	NB6	30.748	QQ/MZ
MATAGALPA	MATIGUAS	Maíz	NB6	31.651	QQ/MZ
RACCN	MULUKUKU	Maíz	NB6	33.76	QQ/MZ
NUEVA SEGOVIA	MURRA	Maíz	NB6	29.543	QQ/MZ
MASAYA	NINDIRÍ	Maíz	NB6	17.191	QQ/MZ
RACCS	NUEVA GUINEA	Maíz	NB6	33.459	QQ/MZ
RACCS	PAIWAS	Maíz	NB6	32.254	QQ/MZ
MADRIZ	PALACAGUINA	Maíz	NB6	21.71	QQ/MZ
ESTELÍ	PUEBLO NUEVO	Maíz	NB6	27.133	QQ/MZ
NUEVA SEGOVIA	QUILALI	Maíz	NB6	29.844	QQ/MZ
MATAGALPA	RANCHO GRANDE	Maíz	NB6	31.049	QQ/MZ
RIVAS	RIVAS	Maíz	NB6	19.903	QQ/MZ
RÍO SAN JUAN	SAN CARLOS	Maíz	NB6	24.12	QQ/MZ
JINOTEGA	SAN JOSE DE BOCAY	Maíz	NB6	35.568	QQ/MZ
ESTELÍ	SAN JUAN DE LIMAY	Maíz	NB6	27.434	QQ/MZ
MADRIZ	SAN JUAN DEL RIO COCO	Maíz	NB6	22.011	QQ/MZ
RIVAS	SAN JUAN DEL SUR	Maíz	NB6	19.3	QQ/MZ
BOACO	SAN LORENZO	Maíz	NB6	28.338	QQ/MZ
CARAZO	SAN MARCOS	Maíz	NB6	21.409	QQ/MZ
RÍO SAN JUAN	SAN MIGUELITO	Maíz	NB6	23.216	QQ/MZ
JINOTEGA	SANTA MARIA DE PANTASMA	Maíz	NB6	35.266	QQ/MZ

CARAZO	SANTA TERESA	Maíz	NB6	20.806	QQ/MZ
CHONTALES	SANTO DOMINGO	Maíz	NB6	18.396	QQ/MZ
RACCN	SIUNA	Maíz	NB6	34.363	QQ/MZ
CHINANDEGA	SOMOTILLO	Maíz	NB6	26.229	QQ/MZ
MADRIZ	SOMOTO	Maíz	NB6	22.313	QQ/MZ
LEÓN	TELÍCA	Maíz	NB6	24.723	QQ/MZ
MADRIZ	TELPANECA	Maíz	NB6	22.614	QQ/MZ
BOACO	TEUSTEPE	Maíz	NB6	28.639	QQ/MZ
MASAYA	TISMA	Maíz	NB6	16.89	QQ/MZ
RIVAS	TOLA	Maíz	NB6	20.204	QQ/MZ
CHINANDEGA	VILLANUEVA	Maíz	NB6	26.53	QQ/MZ
RACCN	WASLALA	Maíz	NB6	34.061	QQ/MZ
JINOTEGA	WIWILI DE JINOTEGA	Maíz	NB6	23.518	QQ/MZ
NUEVA SEGOVIA	WIWILI DE NUEVA SEGOVIA	Maíz	NB6	34.965	QQ/MZ
BOACO	BOACO	Frijol	INTA ROJO	20.316	QQ/MZ
BOACO	SAN LORENZO	Frijol	INTA ROJO	19.497	QQ/MZ
BOACO	TEUSTEPE	Frijol	INTA ROJO	19.907	QQ/MZ
CARAZO	JINOTEPE	Frijol	INTA ROJO	17.039	QQ/MZ
CARAZO	SAN MARCOS	Frijol	INTA ROJO	17.858	QQ/MZ
CARAZO	SANTA TERESA	Frijol	INTA ROJO	17.449	QQ/MZ
CHONTALES	ACOYAPA	Frijol	INTA ROJO	12.942	QQ/MZ
CHONTALES	COMALAPA	Frijol	INTA ROJO	13.352	QQ/MZ
ESTELI	CONDEGA	Frijol	INTA ROJO	28.103	QQ/MZ
ESTELI	ESTELI	Frijol	INTA ROJO	28.512	QQ/MZ
ESTELI	LA TRINIDAD	Frijol	INTA ROJO	27.284	QQ/MZ
ESTELI	PUEBLO NUEVO	Frijol Frijol	INTA ROJO	27.693	QQ/MZ
JINOTEGA	EL CUA	Frijol	INTA ROJO	34.657	QQ/MZ

JINOTEGA	JINOTEGA	Frijol	INTA ROJO	33.838	QQ/MZ
JINOTEGA	SAN JOSE DE BOCAY	Frijol	INTA ROJO	35.884	QQ/MZ
JINOTEGA	SAN SEBASTIAN DE YALI	Frijol	INTA ROJO	34.247	QQ/MZ
JINOTEGA	SANTA MARIA DE PANTASMA	Frijol	INTA ROJO	35.067	QQ/MZ
JINOTEGA	WIWILI DE JINOTEGA	Frijol	INTA ROJO	25.715	QQ/MZ
LEON	ACHUAPA	Frijol	INTA ROJO	16.629	QQ/MZ
LEON	EL SAUCE	Frijol	INTA ROJO	16.22	QQ/MZ
LEON	SANTA ROSA DEL PEOON	Frijol	INTA ROJO	15.81	QQ/MZ
LEON	TELICA	Frijol	INTA ROJO	15.4	QQ/MZ
MADRIZ	PALACAGUINA	Frijol	INTA ROJO	25.642	QQ/MZ
MADRIZ	SAN JUAN DEL RIO COCO	Frijol	INTA ROJO	26.055	QQ/MZ
MADRIZ	SAN LUCAS	Frijol	INTA ROJO	25.232	QQ/MZ
MADRIZ	SOMOTO	Frijol	INTA ROJO	26.464	QQ/MZ
MADRIZ	TELPANECA	Frijol	INTA ROJO	26.874	QQ/MZ
MASAYA	LA CONCEPCION	Frijol	INTA ROJO	13.762	QQ/MZ
MASAYA	MASATEPE	Frijol	INTA ROJO	14.991	QQ/MZ
MASAYA	MASAYA	Frijol	INTA ROJO	14.581	QQ/MZ
MASAYA	NINDIRI	Frijol	INTA ROJO	14.171	QQ/MZ
MATAGALPA	EL TUMA - LA DALIA	Frijol	INTA ROJO	30.97	QQ/MZ
MATAGALPA	MATAGALPA	Frijol	INTA ROJO	30.561	QQ/MZ
MATAGALPA	MATIGUAS	Frijol	INTA ROJO	29.741	QQ/MZ
MATAGALPA	RANCHO GRANDE	Frijol	INTA ROJO	30.151	QQ/MZ
MATAGALPA	SAN DIONISIO	Frijol	INTA ROJO	29.332	QQ/MZ

MATAGALPA	SAN RAMON	Frijol	INTA ROJO	28.922	QQ/MZ
NUEVA SEGOVIA	EL JICARO	Frijol	INTA ROJO	33.428	QQ/MZ
NUEVA SEGOVIA	JALAPA	Frijol	INTA ROJO	33.018	QQ/MZ
NUEVA SEGOVIA	MURRA	Frijol	INTA ROJO	31.79	QQ/MZ
NUEVA SEGOVIA	QUILALI	Frijol	INTA ROJO	32.609	QQ/MZ
NUEVA SEGOVIA	SANTA MARIA	Frijol	INTA ROJO	31.38	QQ/MZ
NUEVA SEGOVIA	WIWILI DE NUEVA SEGOVIA	Frijol	INTA ROJO	32.199	QQ/MZ
RACCN	MULUKUKU	Frijol	INTA ROJO	24.003	QQ/MZ
RACCN	ROSITA	Frijol	INTA ROJO	23.594	QQ/MZ
RACCN	SIUNA	Frijol	INTA ROJO	24.823	QQ/MZ
RACCN	WASLALA	Frijol	INTA ROJO	24.413	QQ/MZ
RACCN	WASPAM	Frijol	INTA ROJO	23.184	QQ/MZ
RACCS	BLUEFIELDS	Frijol	INTA ROJO	21.955	QQ/MZ
RACCS	EL RAMA	Frijol	INTA ROJO	22.365	QQ/MZ
RACCS	EL TORTUGUERO	Frijol	INTA ROJO	21.136	QQ/MZ
RACCS	LA CRUZ DE RIO GRANDE	Frijol	INTA ROJO	21.545	QQ/MZ
RACCS	NUEVA GUINEA	Frijol	INTA ROJO	22.774	QQ/MZ
RACCS	PAIWAS	Frijol	INTA ROJO	20.726	QQ/MZ
RIO SAN JUAN	EL CASTILLO	Frijol	INTA ROJO	18.678	QQ/MZ
RIO SAN JUAN	SAN CARLOS	Frijol	INTA ROJO	19.087	QQ/MZ
RIO SAN JUAN	SAN MIGUELITO	Frijol	INTA ROJO	18.268	QQ/MZ

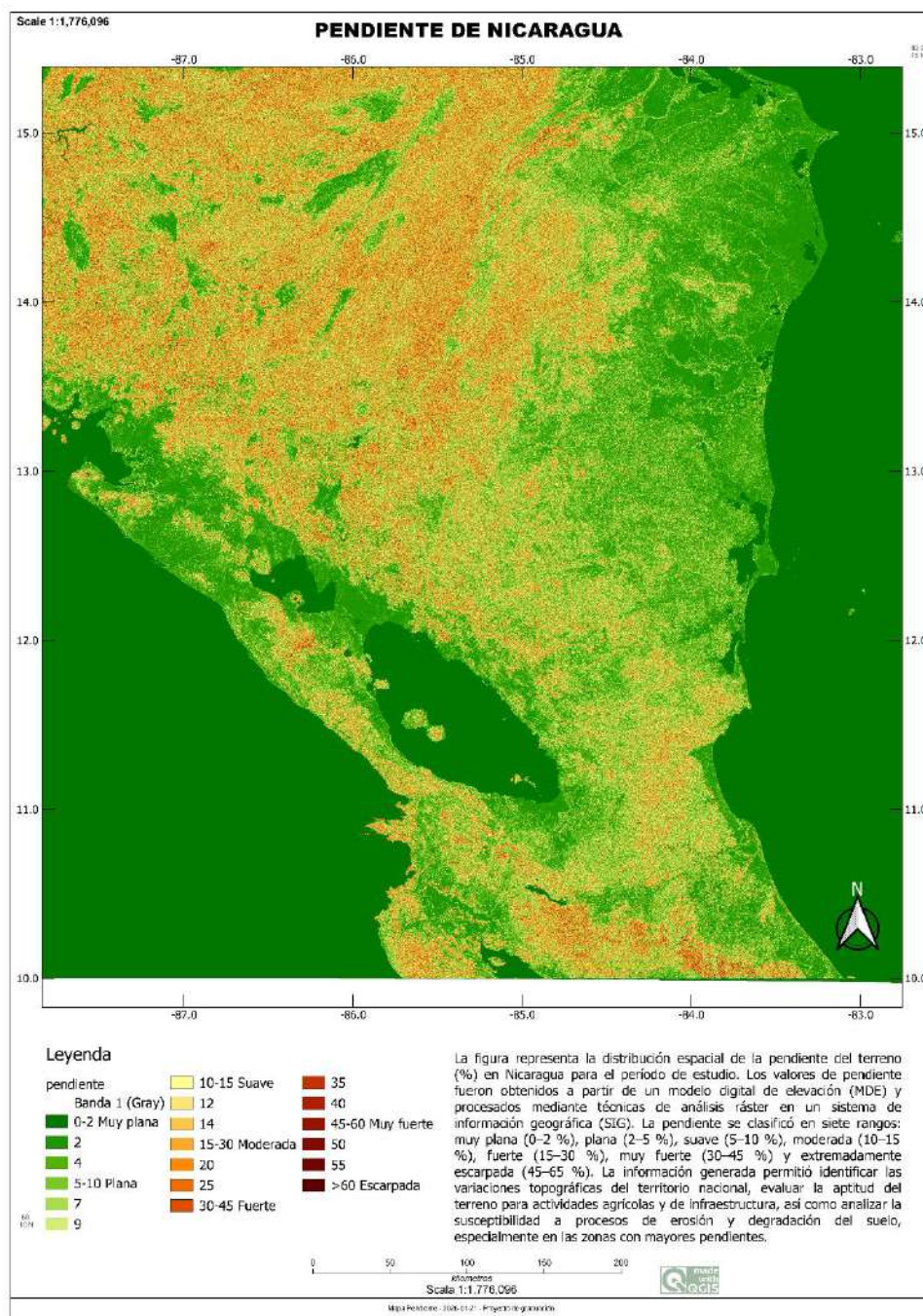
Nota: Datos del CENAGRO, censo Nacional Agropecuario.

Anexo 4

Mapas temáticos faltantes de las variables edafoclimáticas.

Figura 22

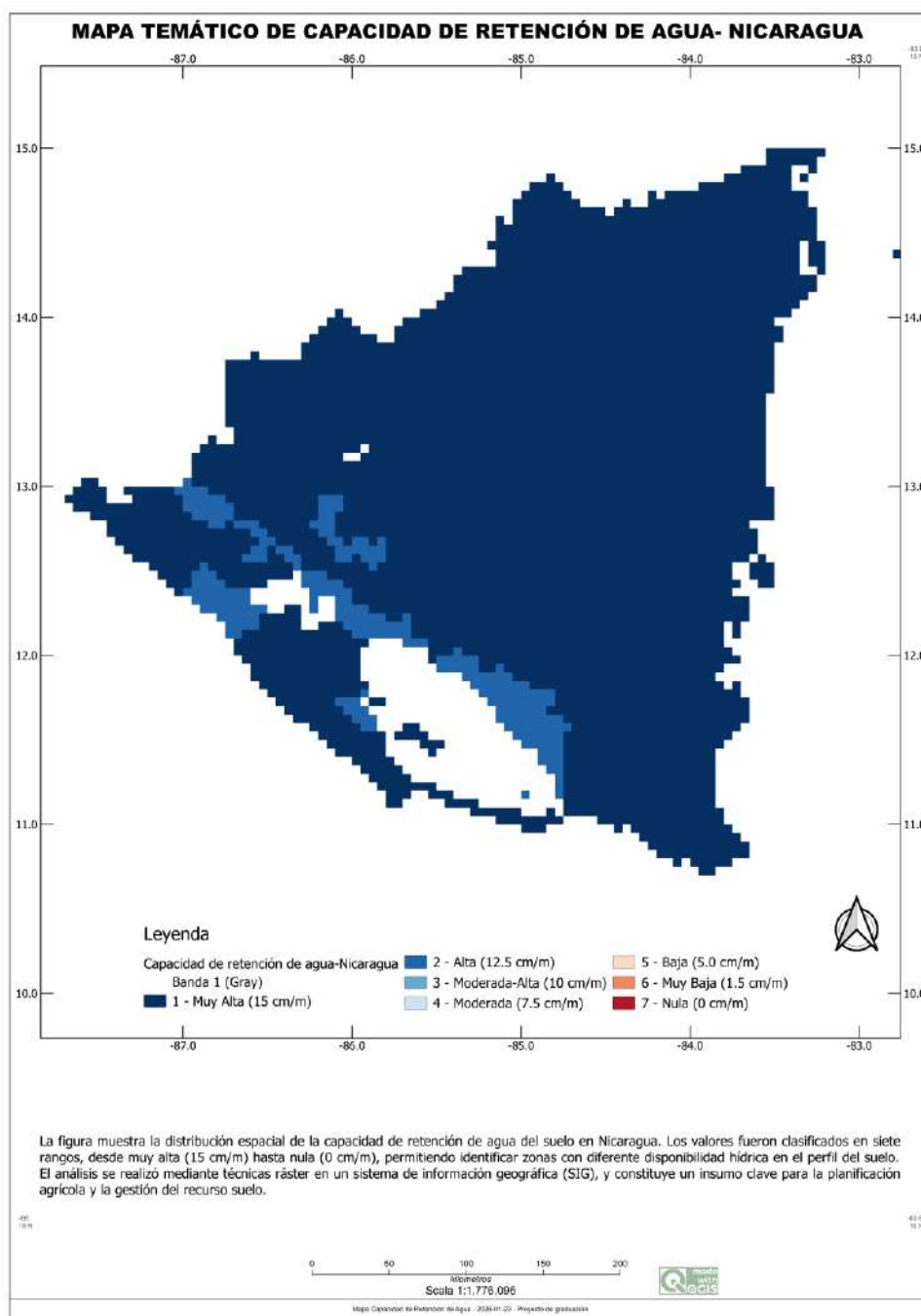
Pendiente



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 23

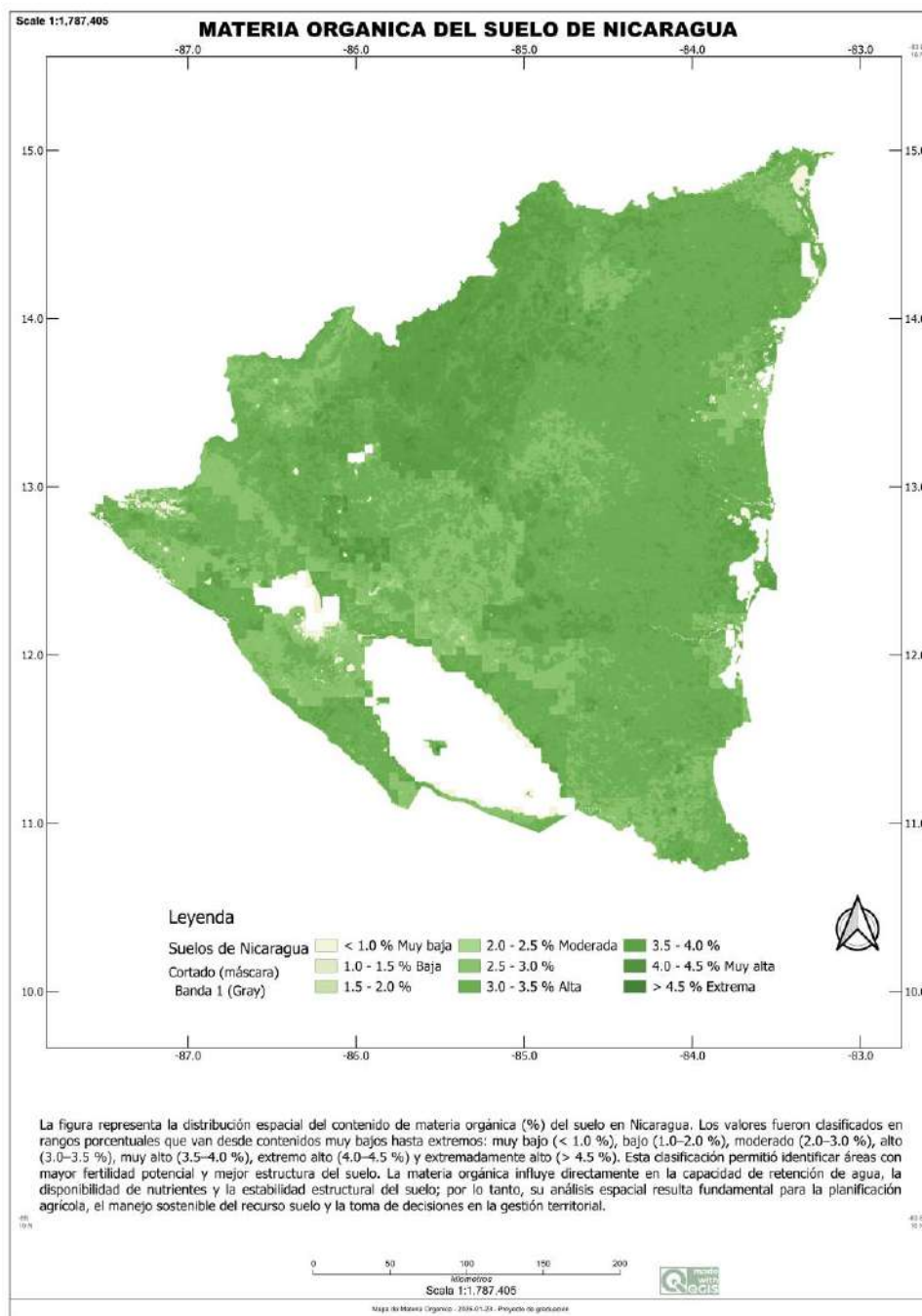
Capacidad de retención de agua



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 24

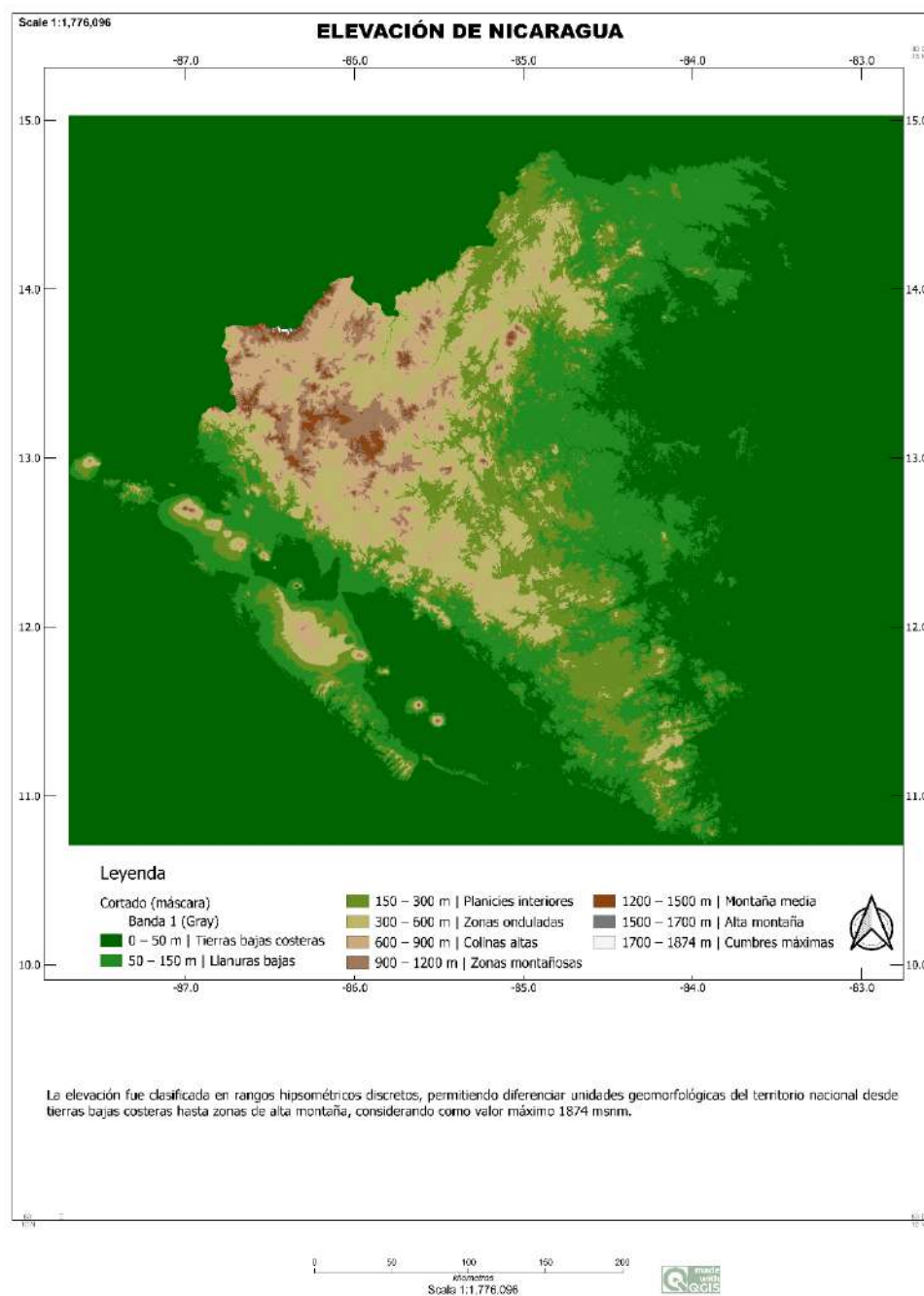
Materia Orgánica



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 25

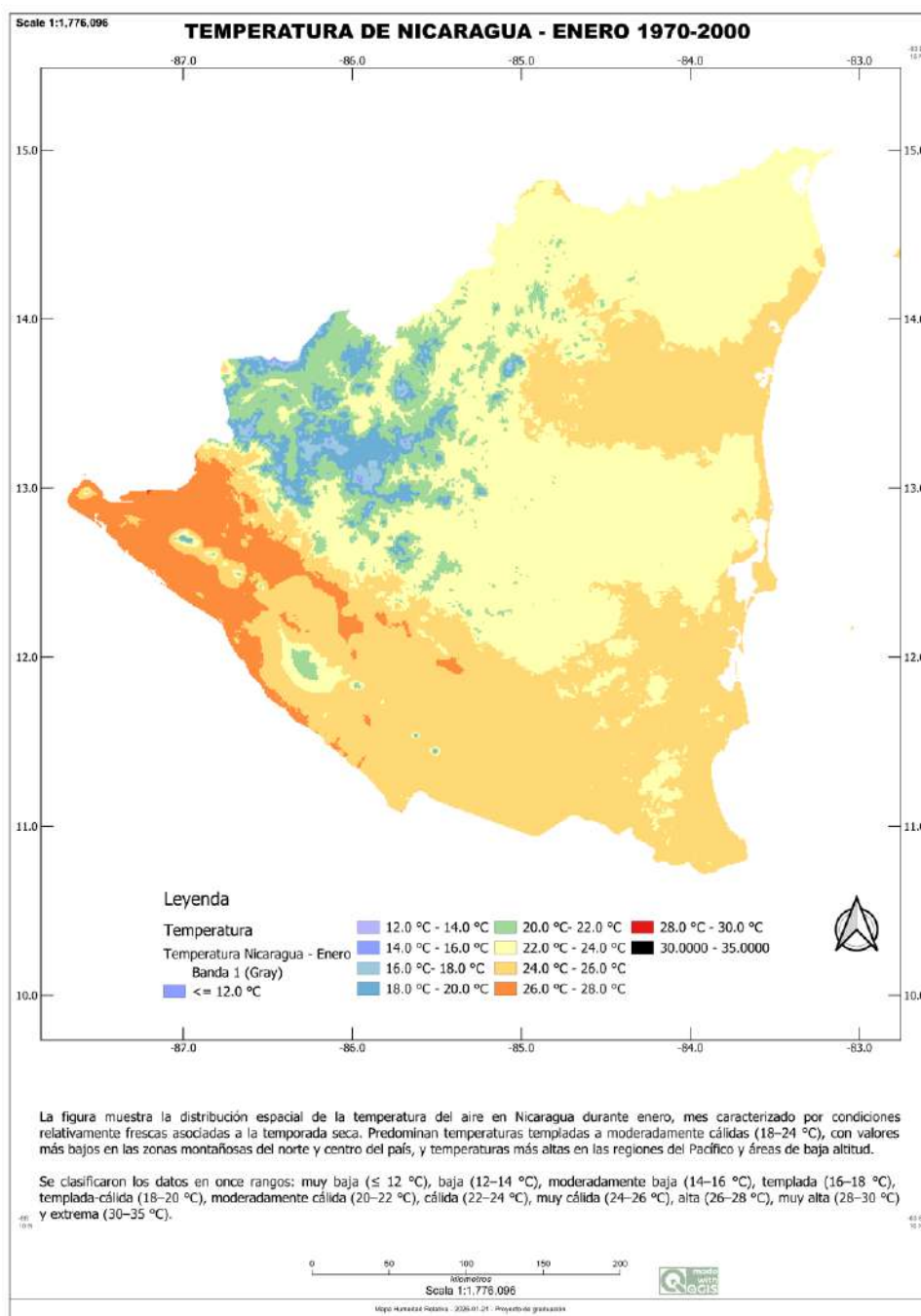
Elevación



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 26

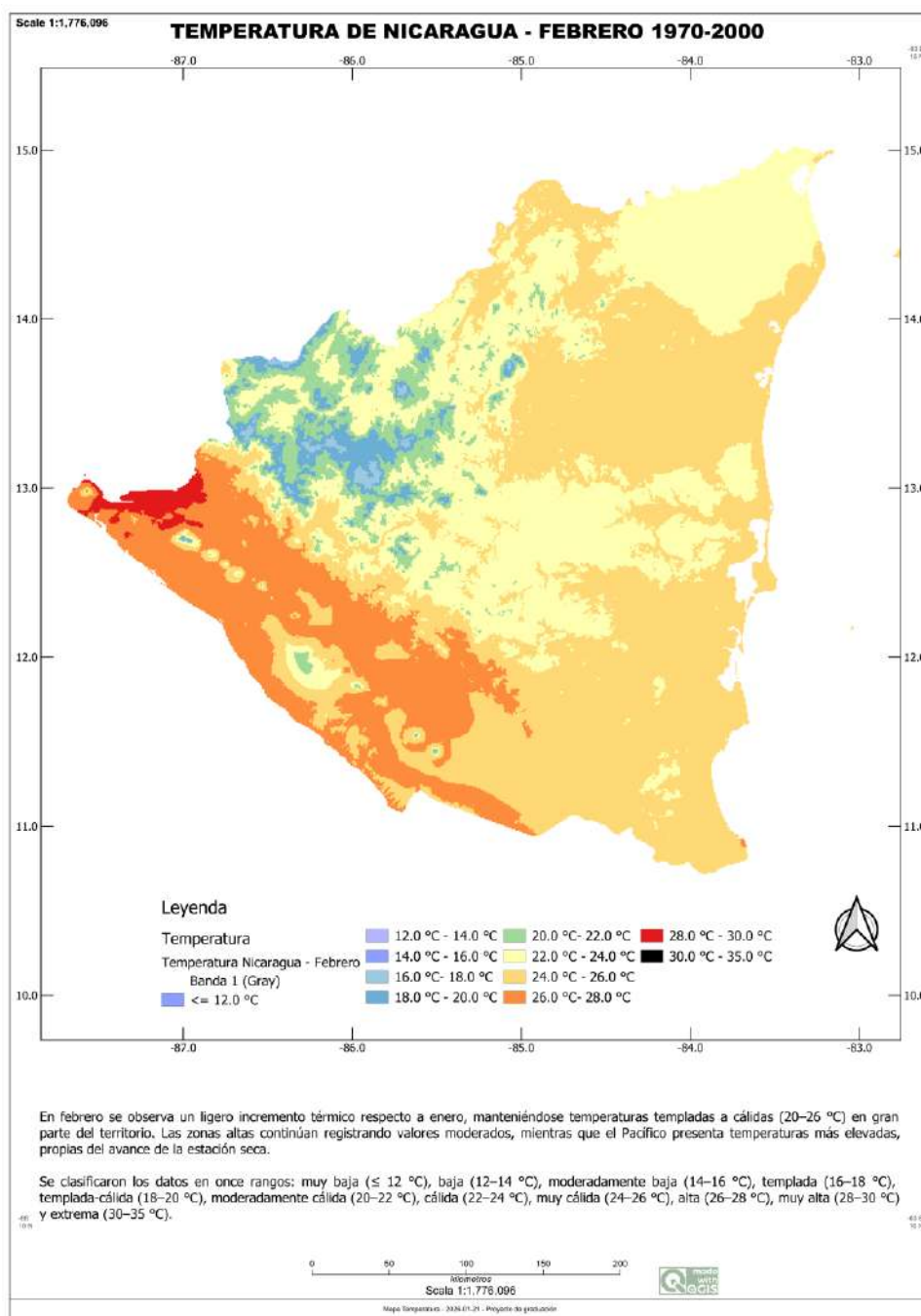
Temperatura – Enero



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 27

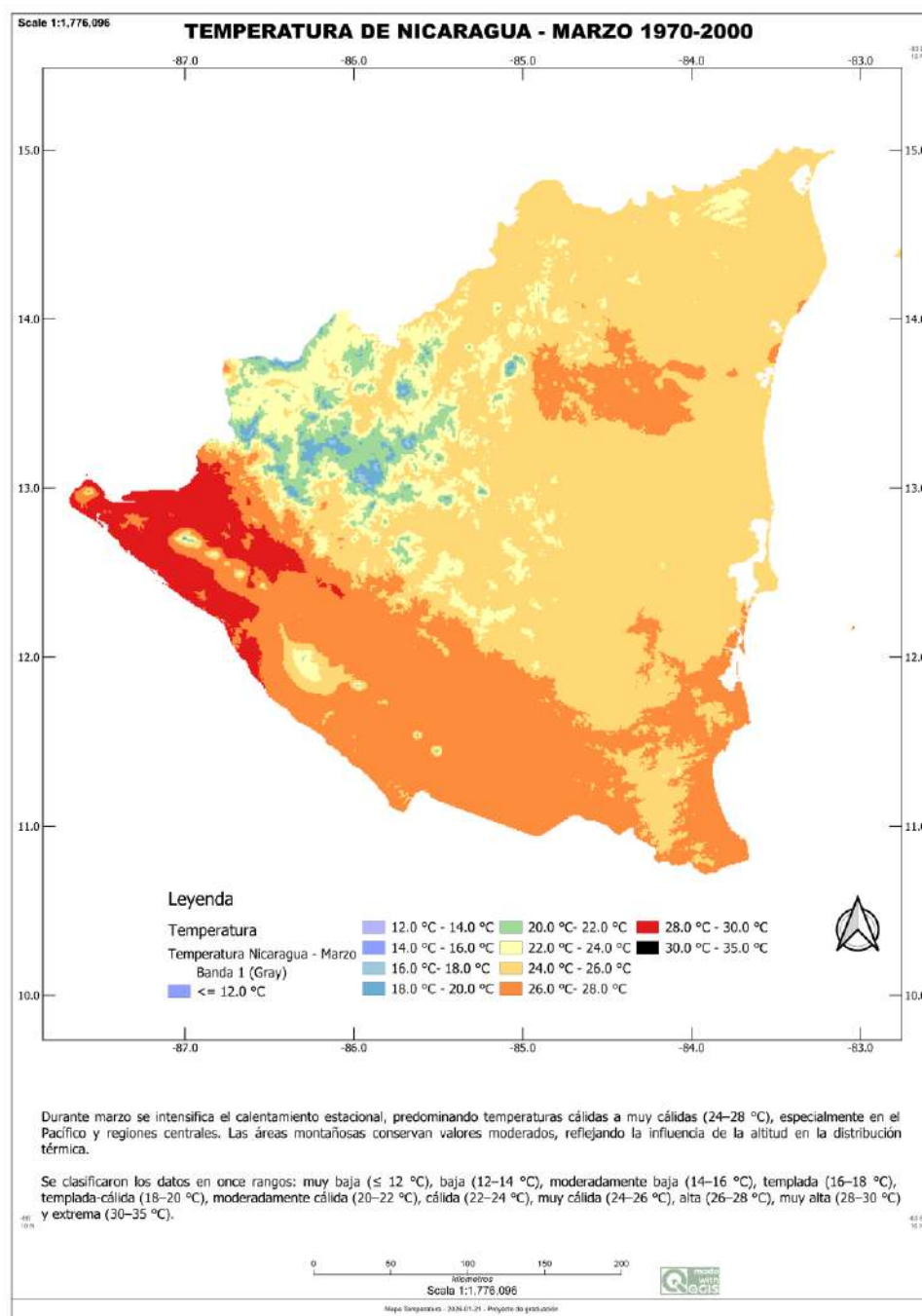
Temperatura – Febrero



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 28

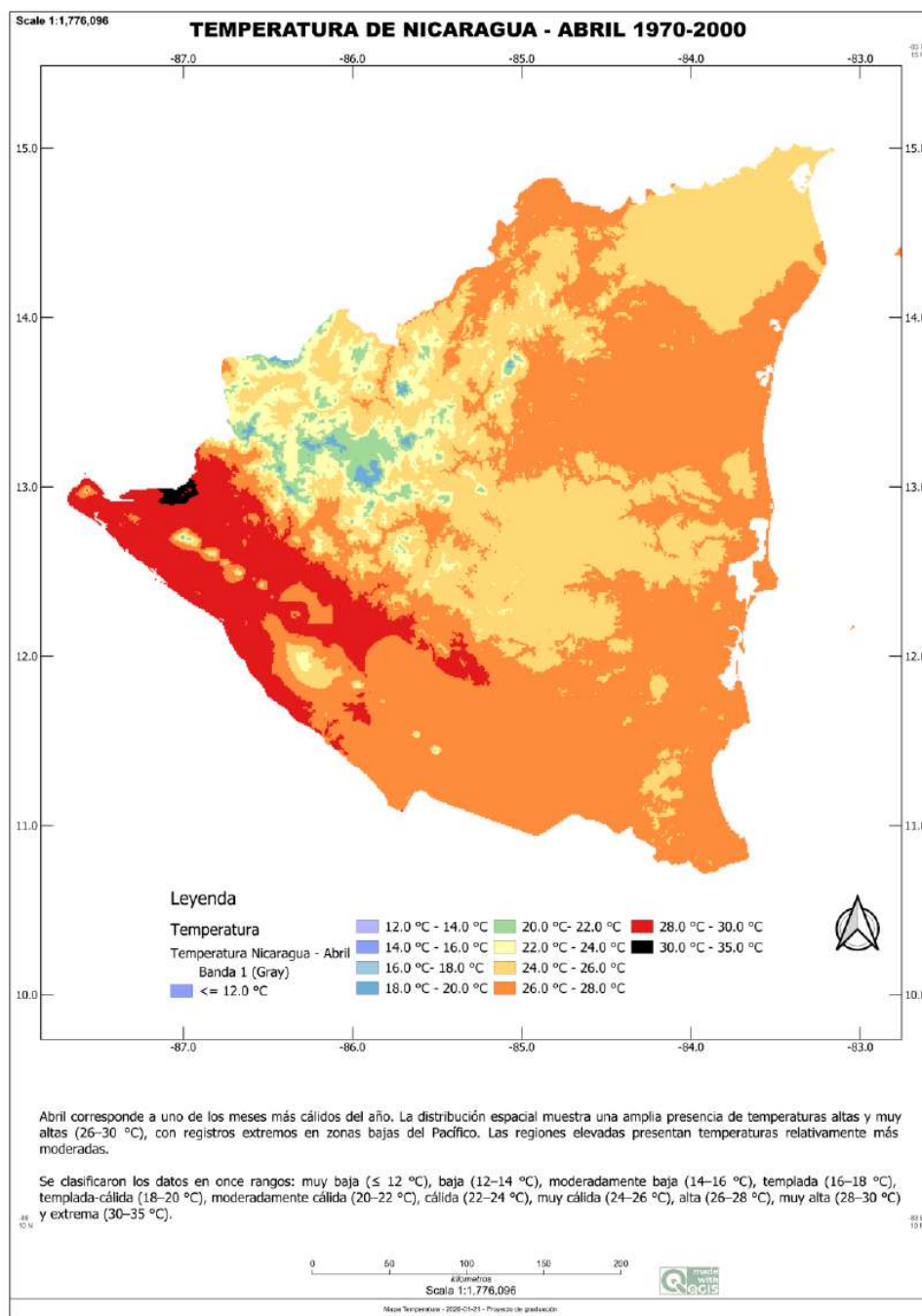
Temperatura – Marzo



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 29

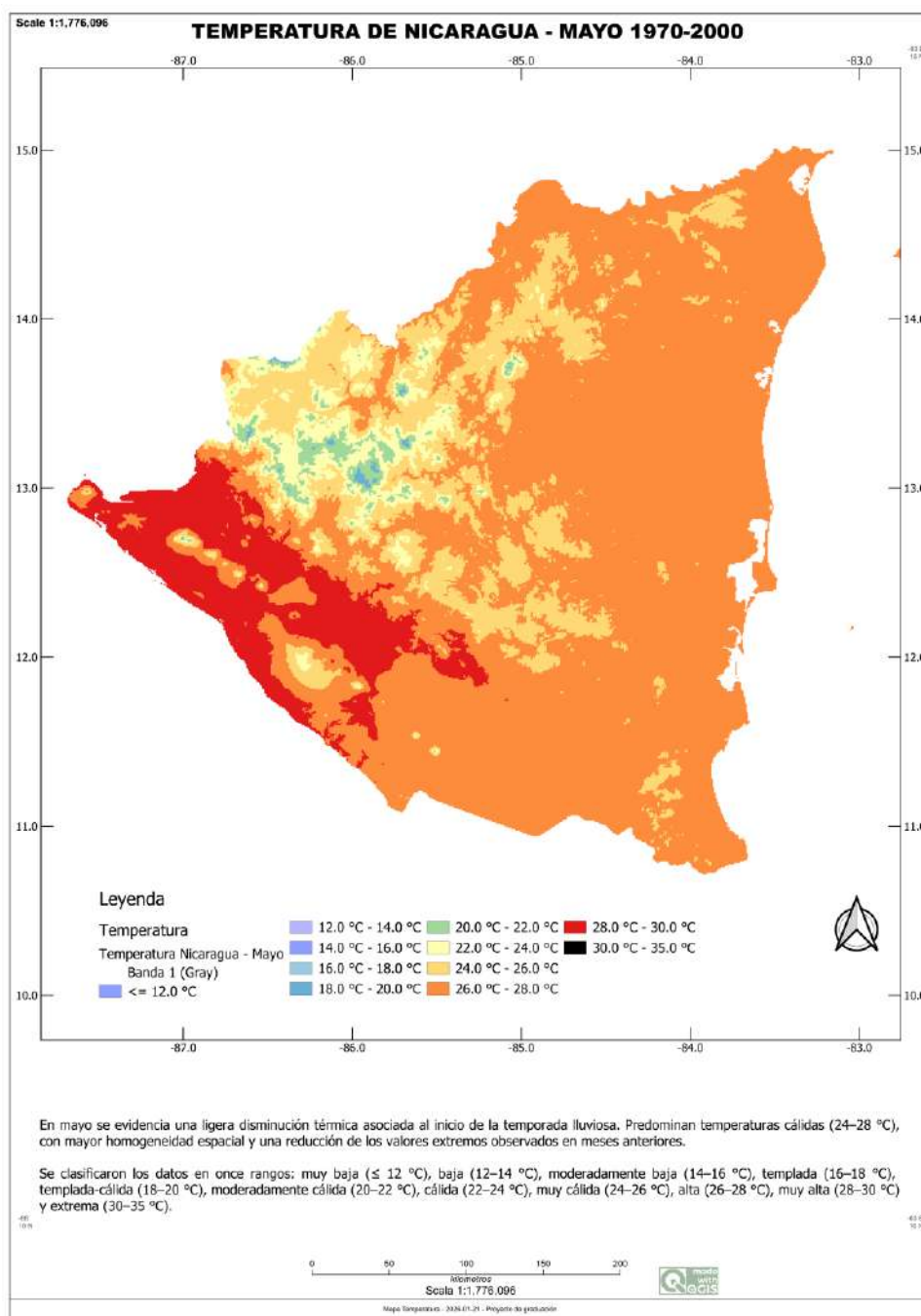
Temperatura – Abril



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 30

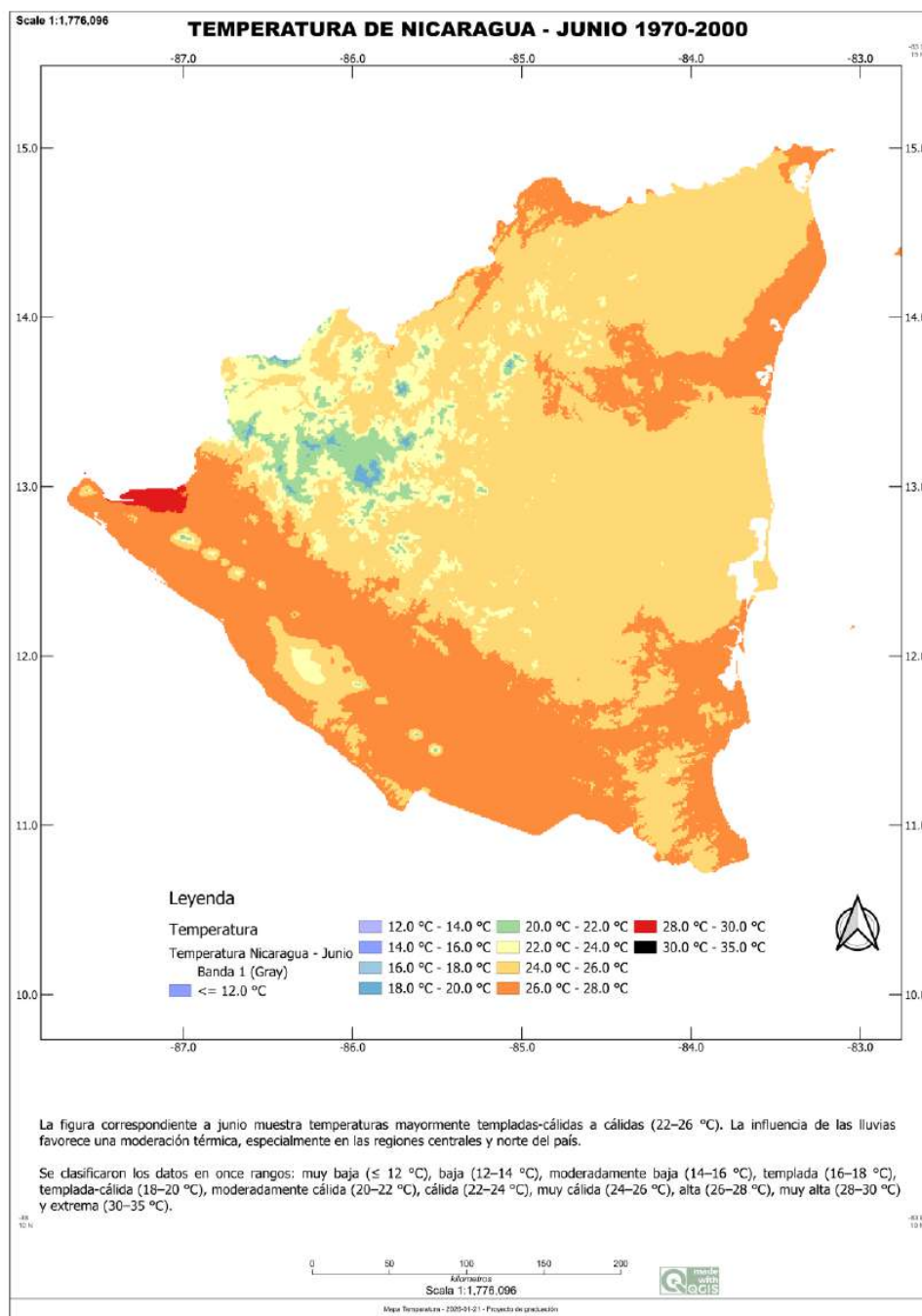
Temperatura – Mayo



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 31

Temperatura – Junio



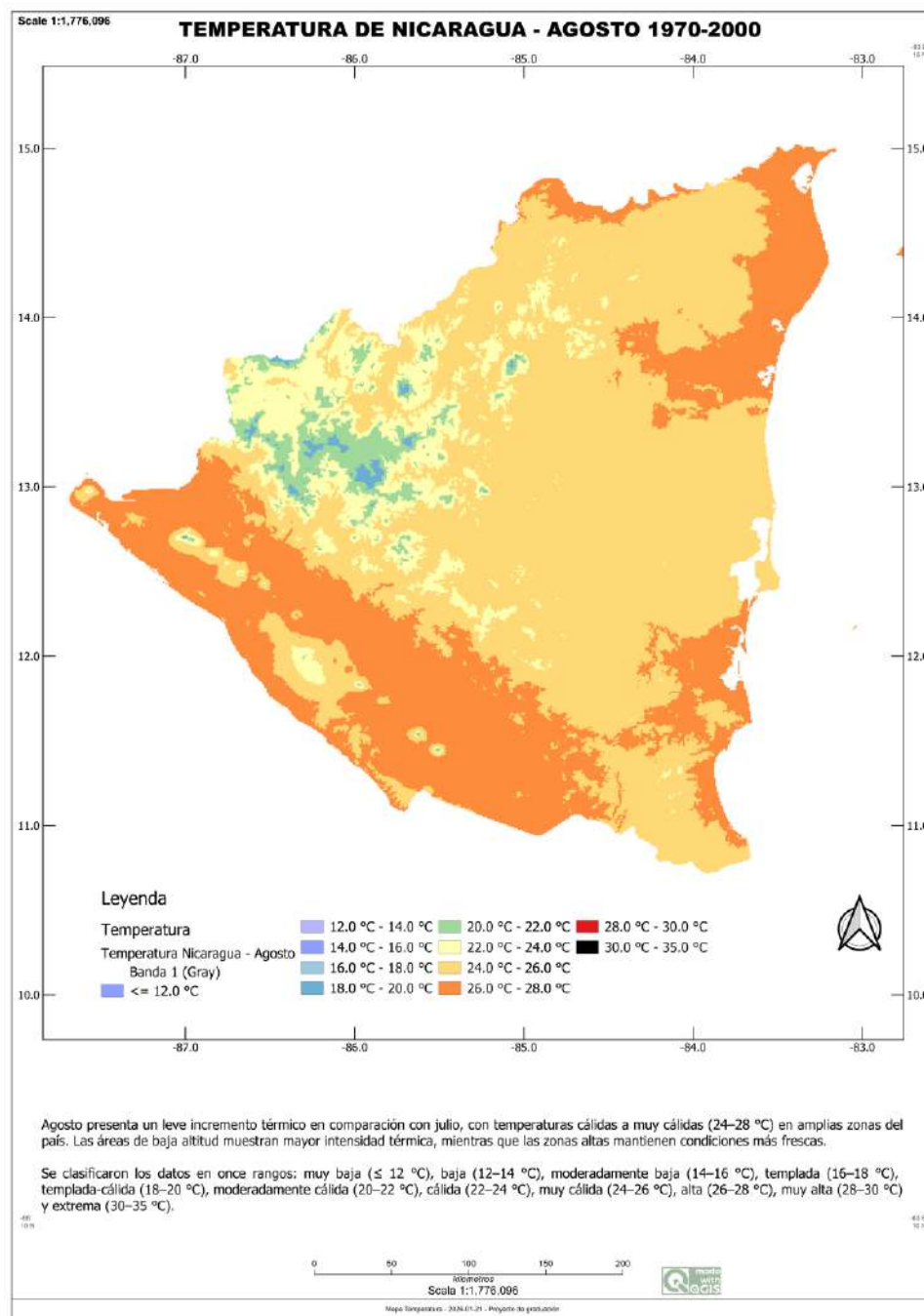
Nota: Generado con Software QGIS.

Temperatura – Julio



Figura 33

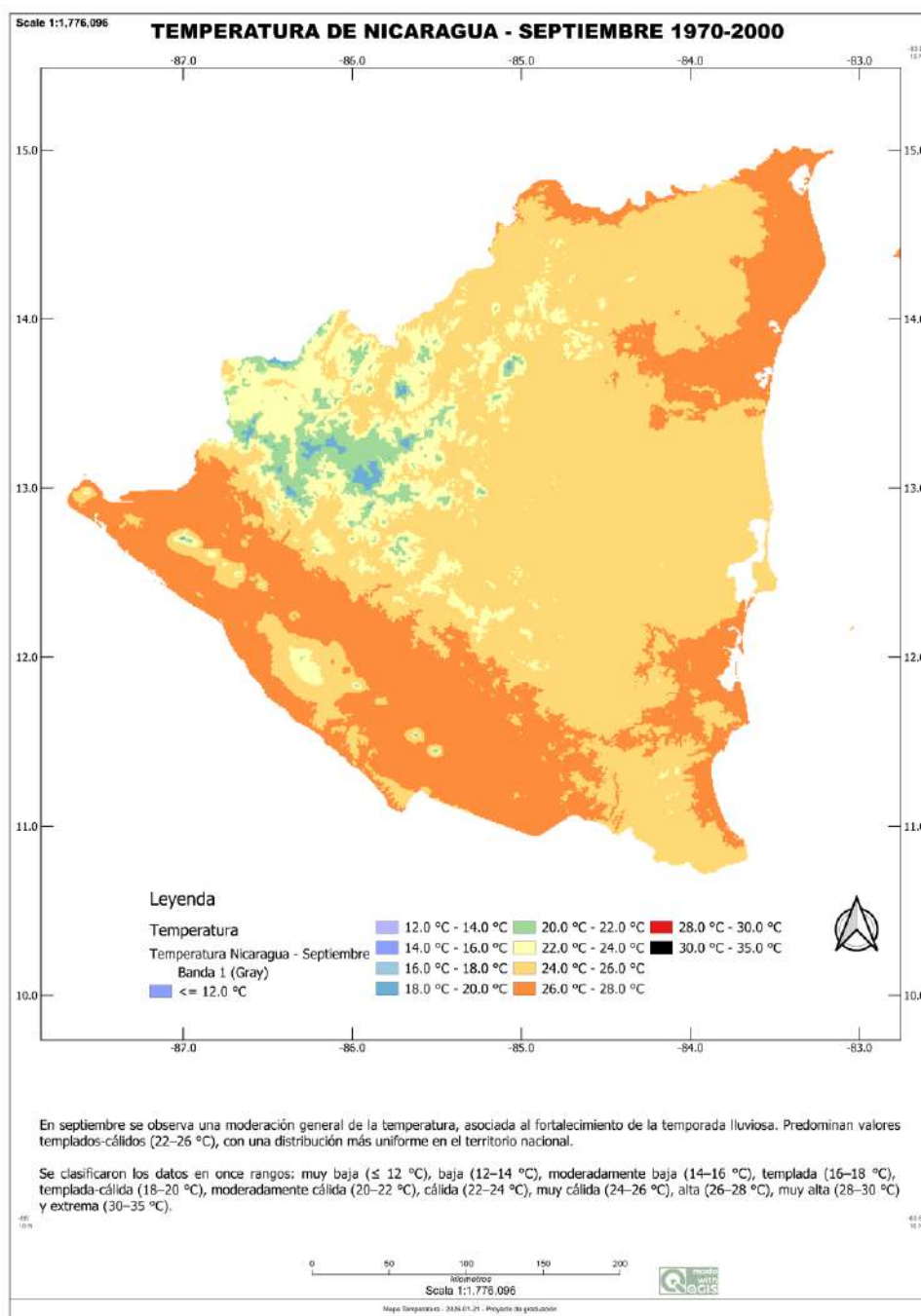
Temperatura – Agosto



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 34

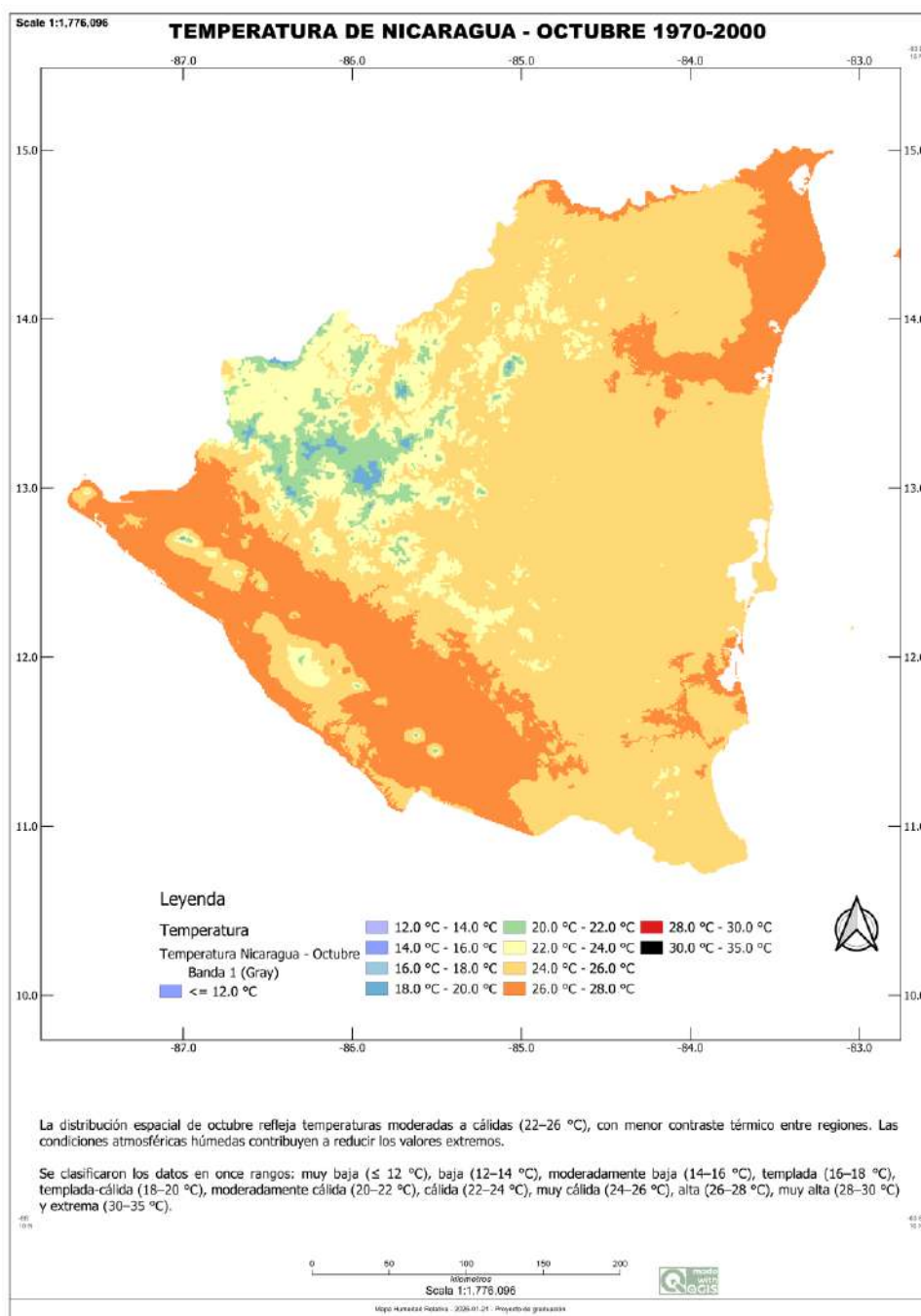
Temperatura – Septiembre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 35

Temperatura – Octubre



Nota: Generado con Software QGIS.

Temperatura – Novembre

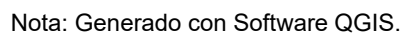
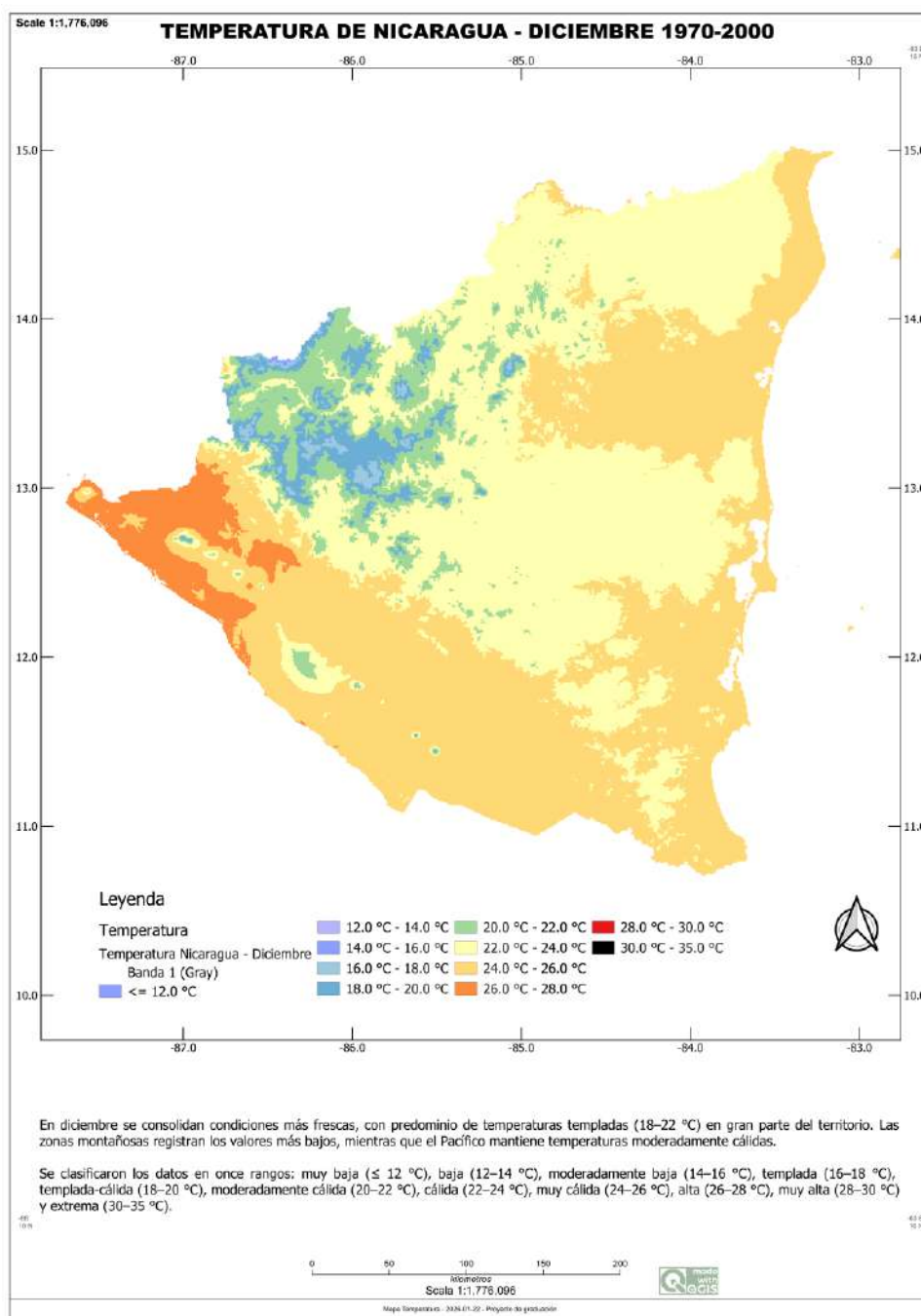


Figura 37

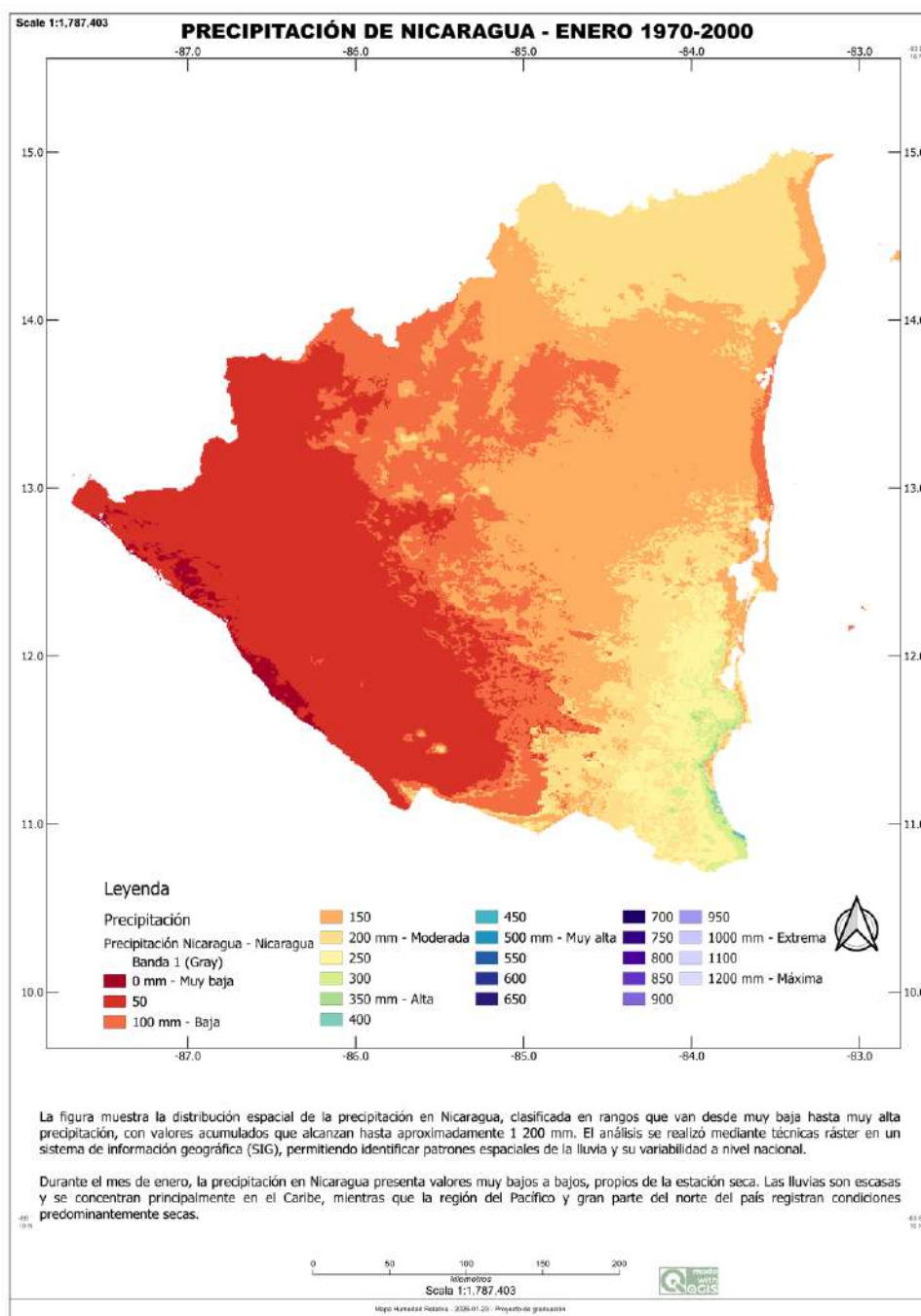
Temperatura – Diciembre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 38

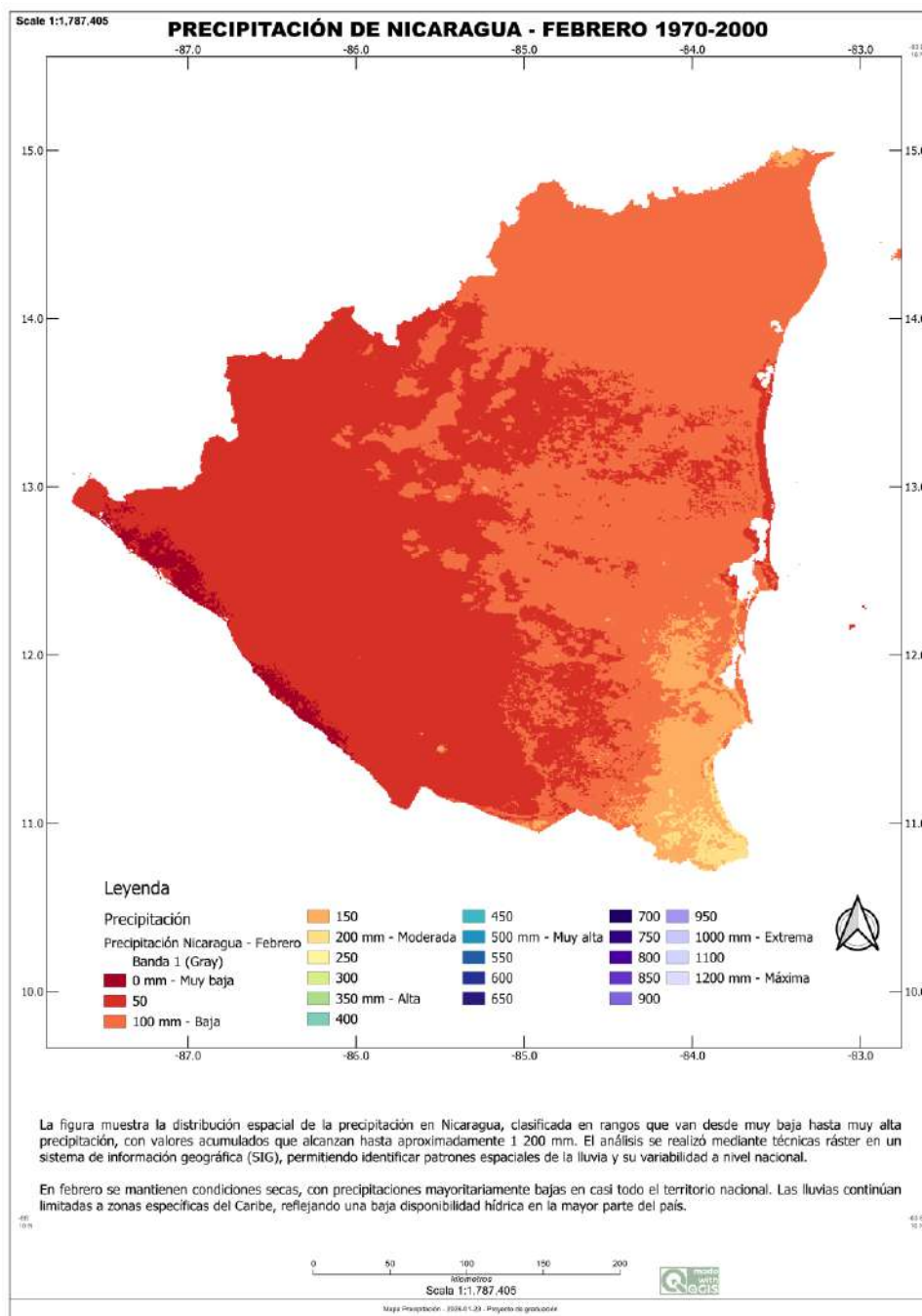
Precipitación – Enero



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 39

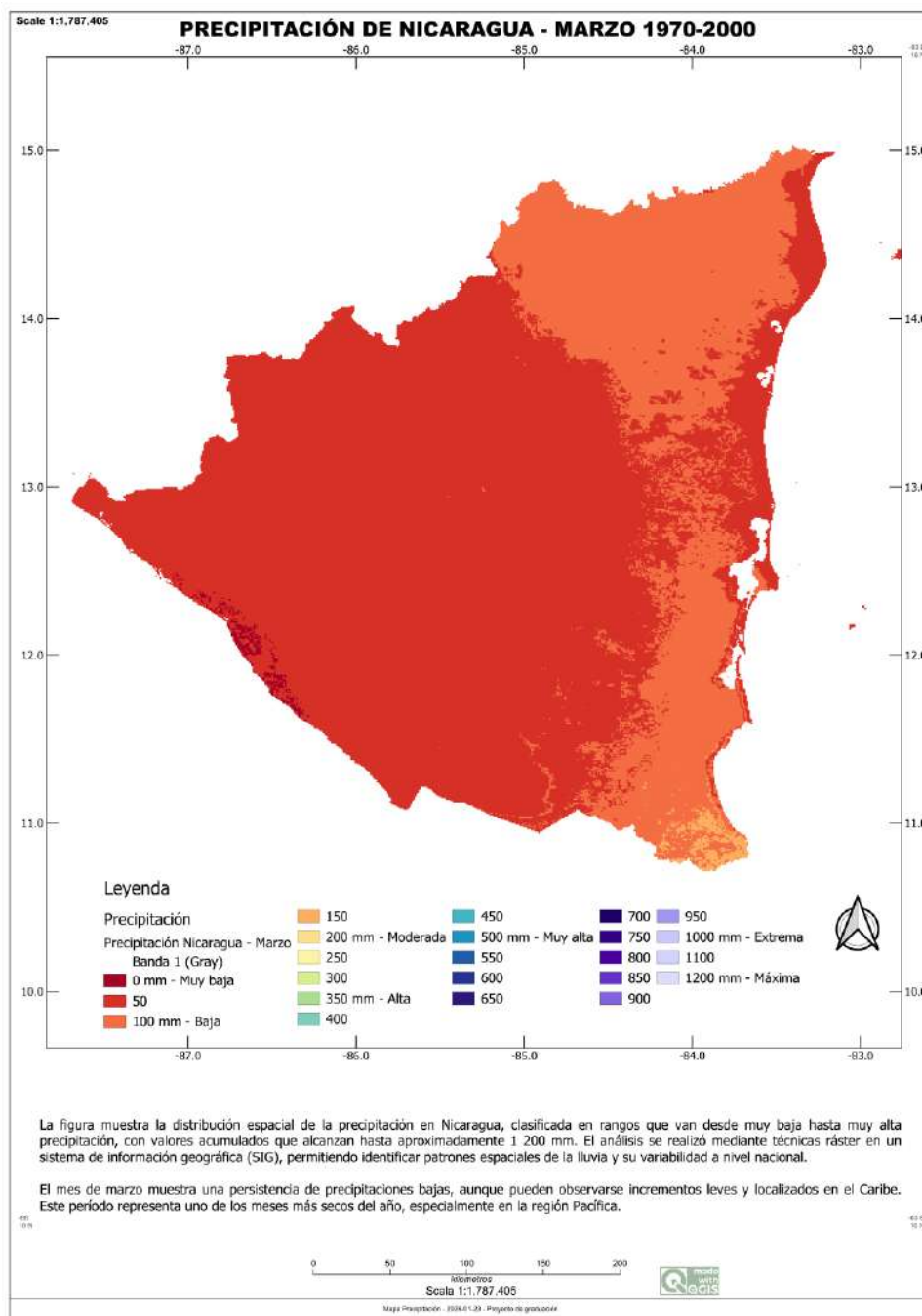
Precipitación – Febrero



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 40

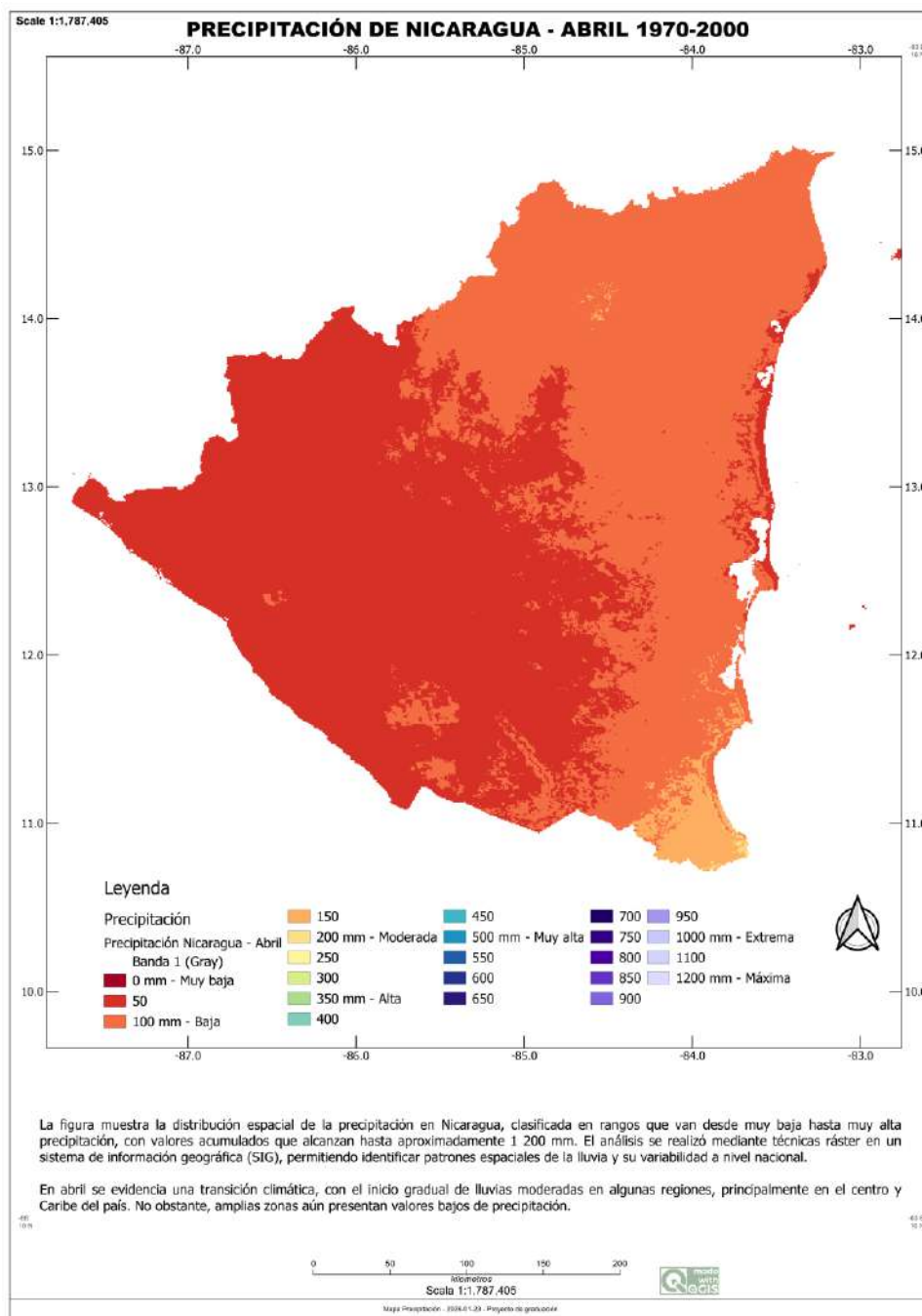
Precipitación – Marzo



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 41

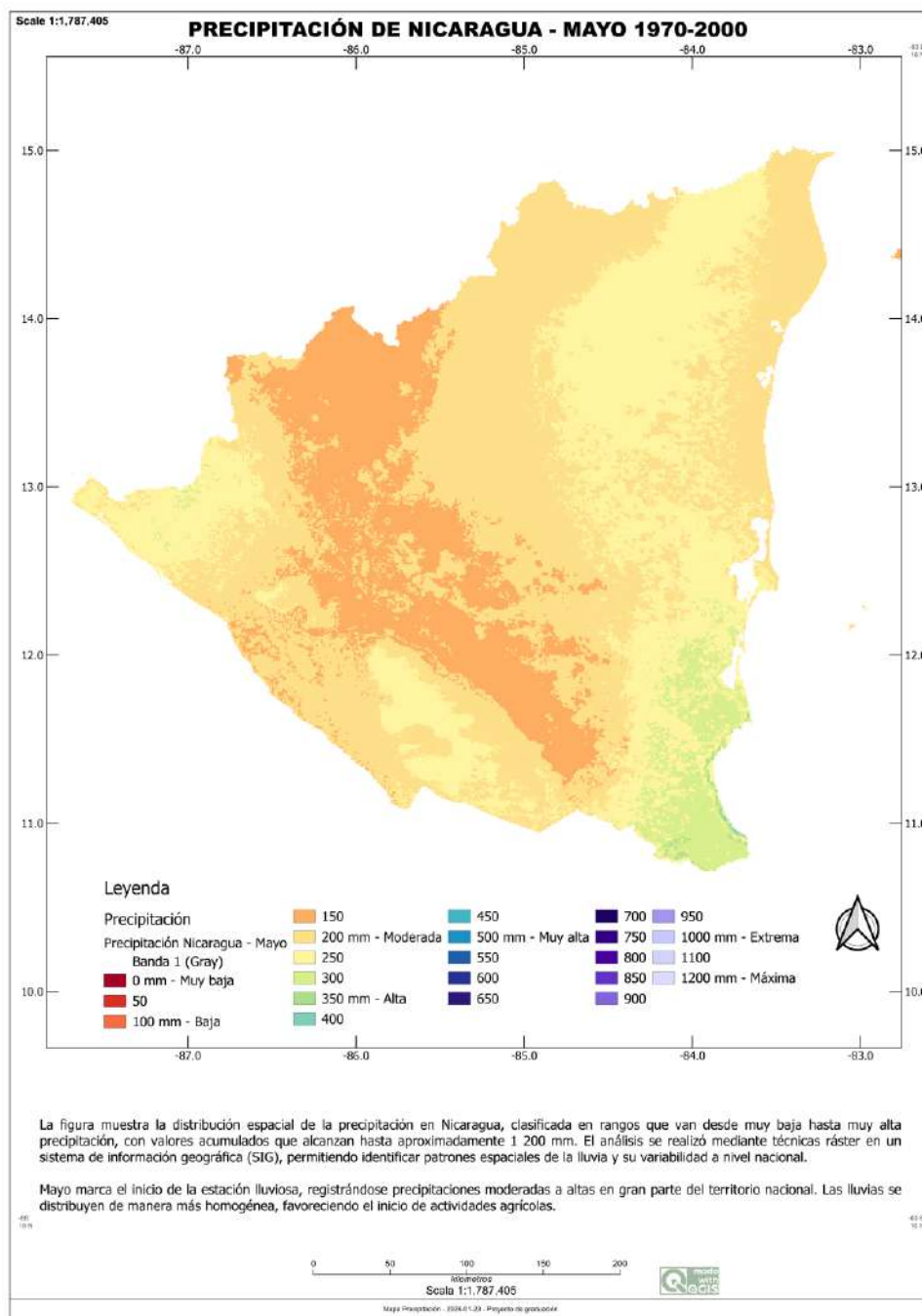
Precipitación – Abril



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 42

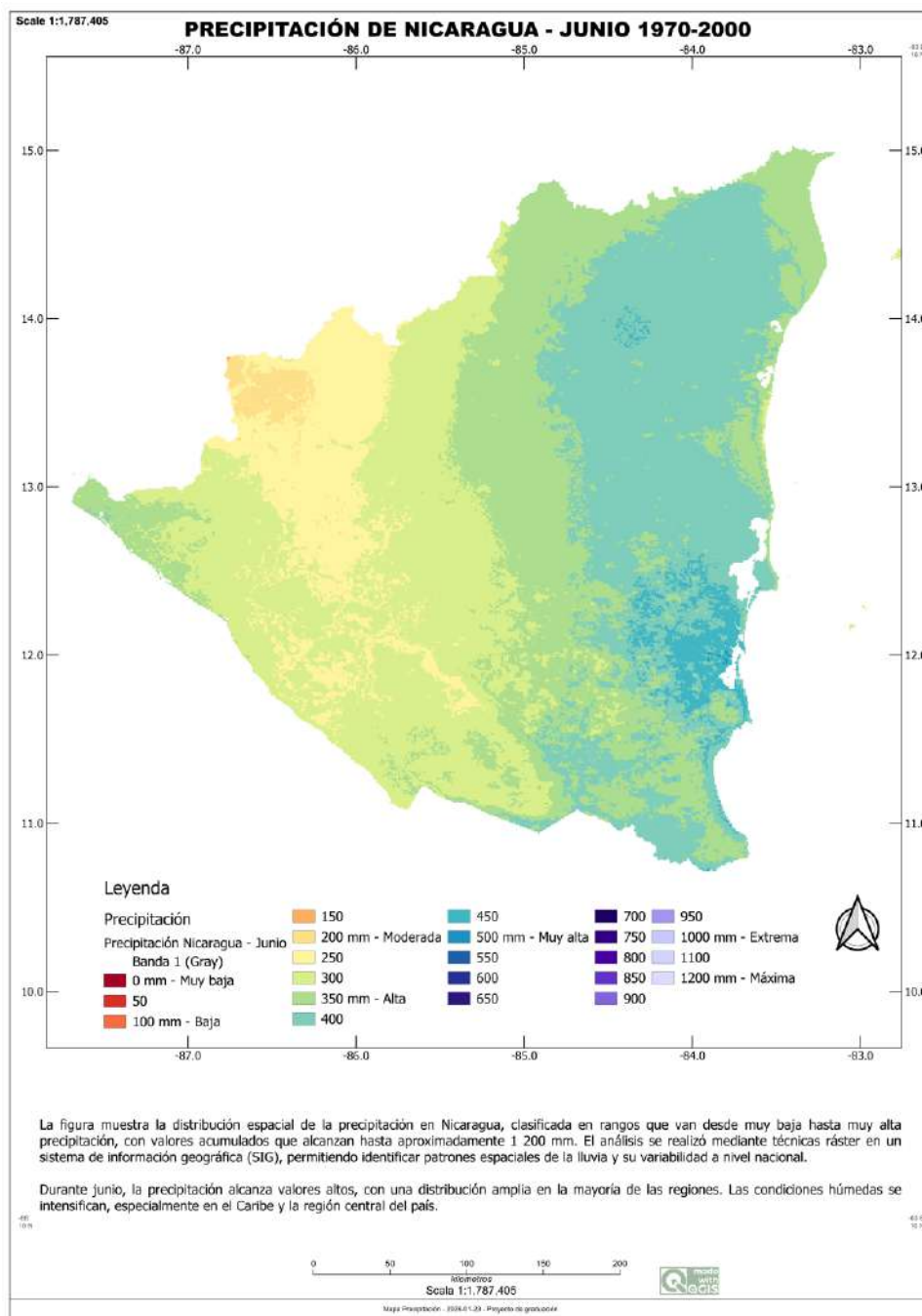
Precipitación – Mayo



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 43

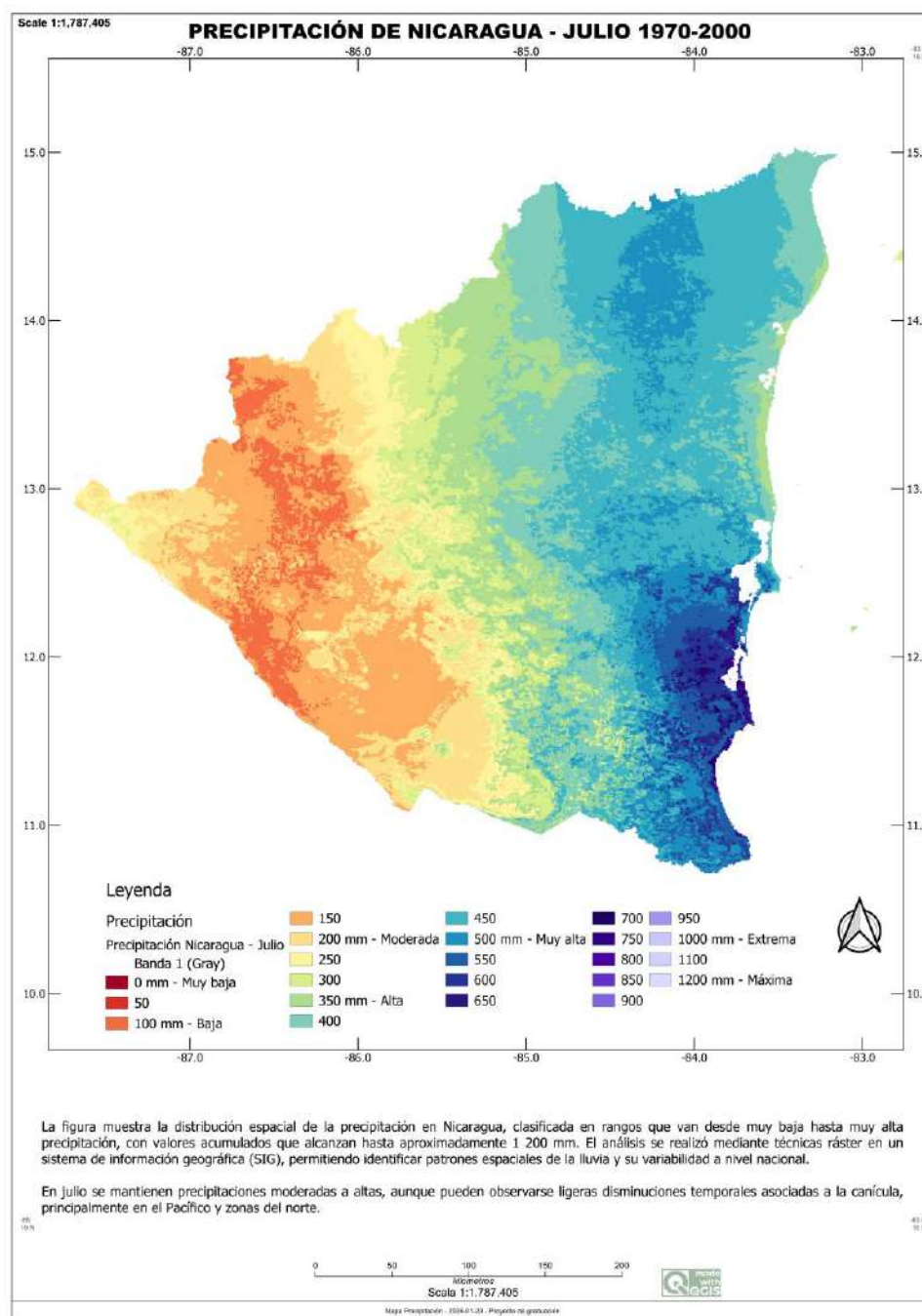
Precipitación – Junio



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 44

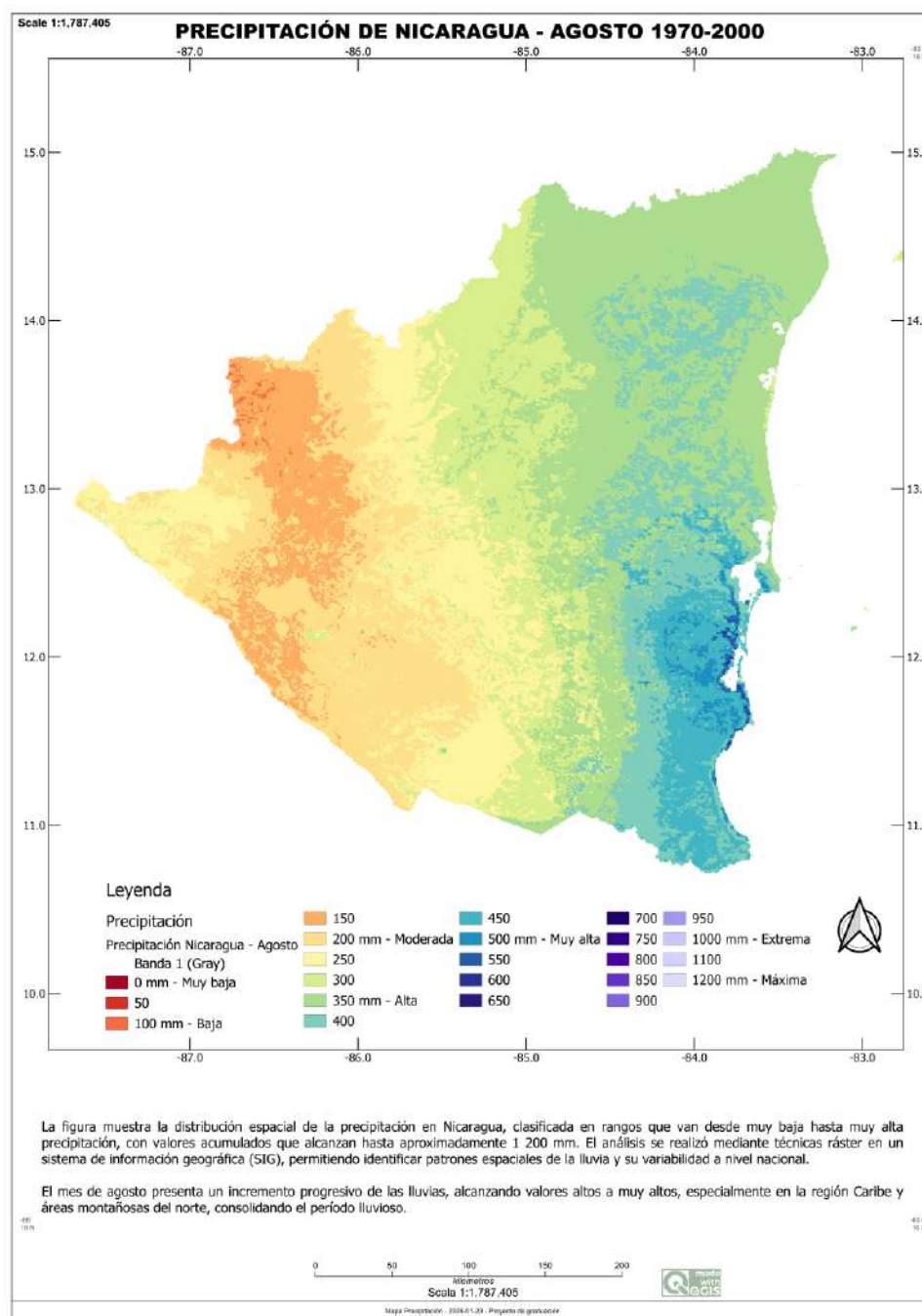
Precipitación – Julio



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 45

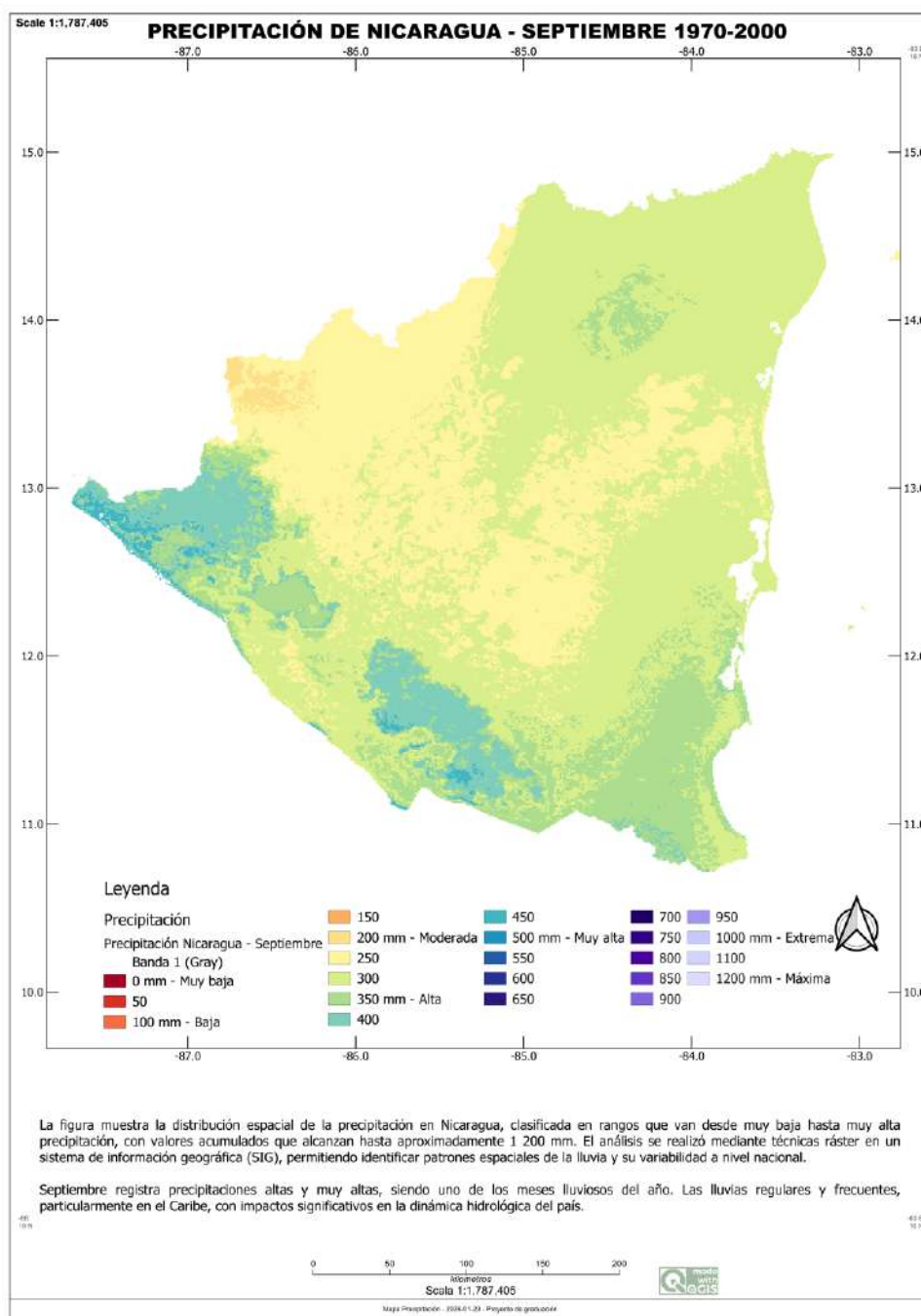
Precipitación – Agosto



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 46

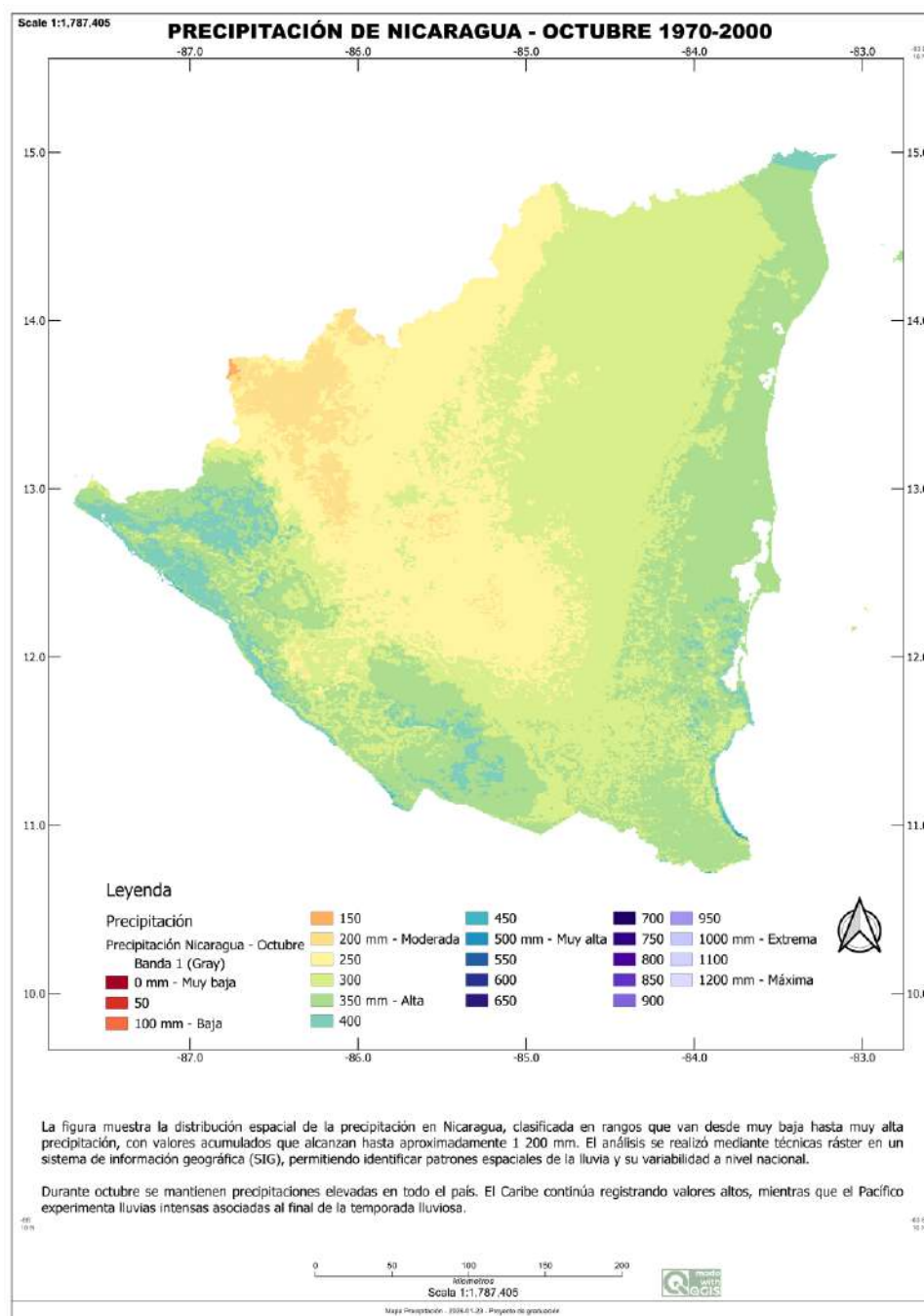
Precipitación – Septiembre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 47

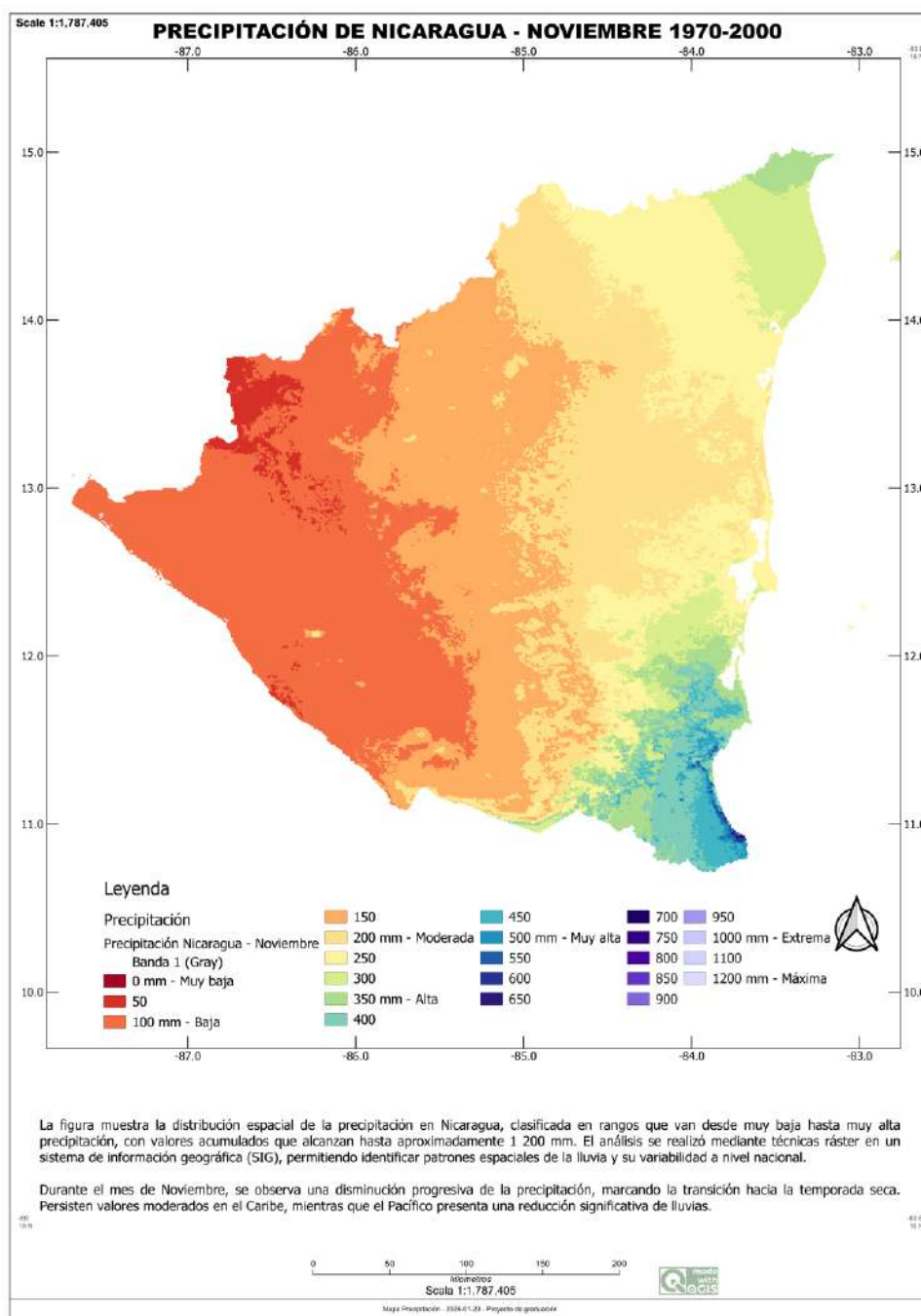
Precipitación – Octubre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 48

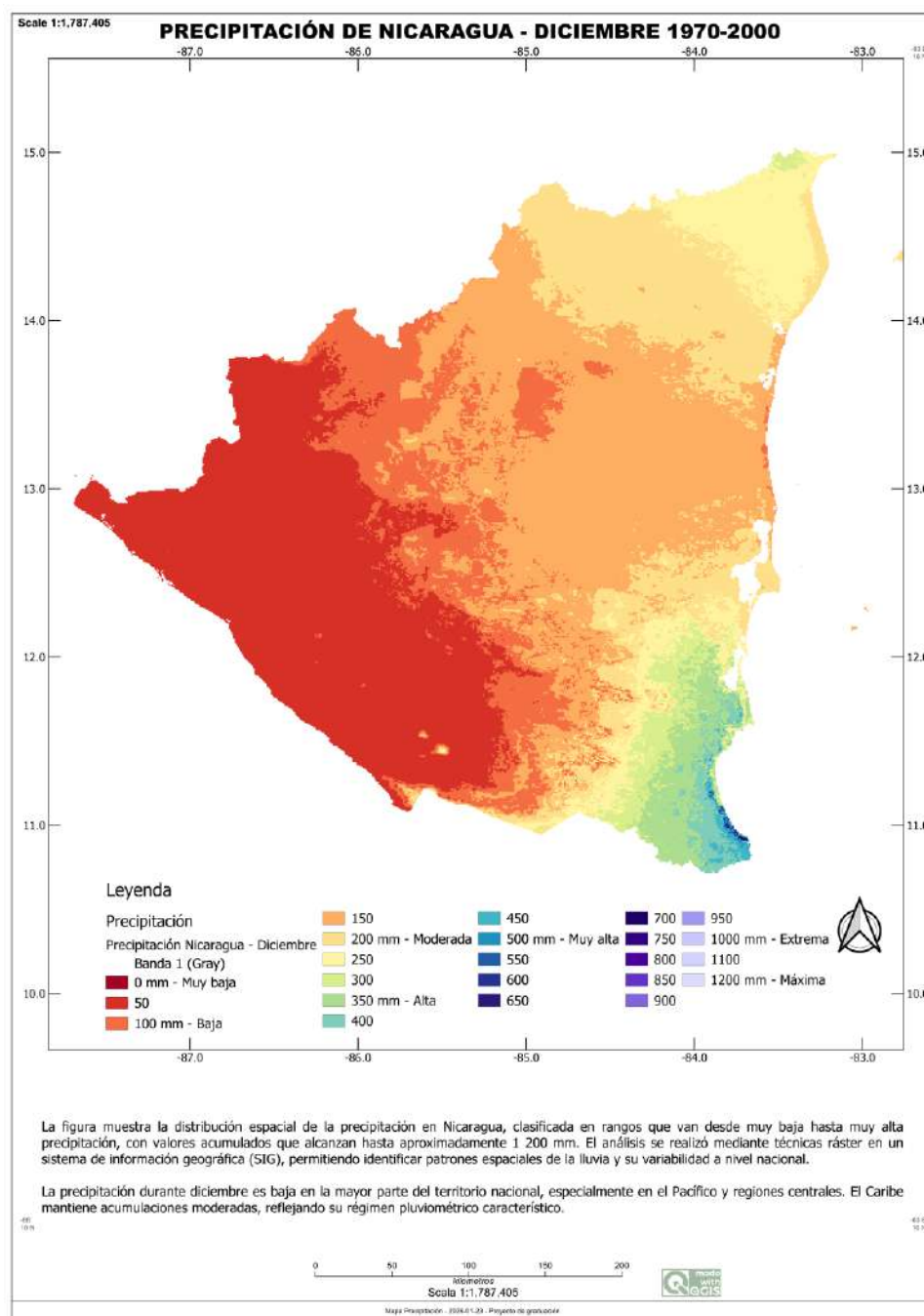
Precipitación – Noviembre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 49

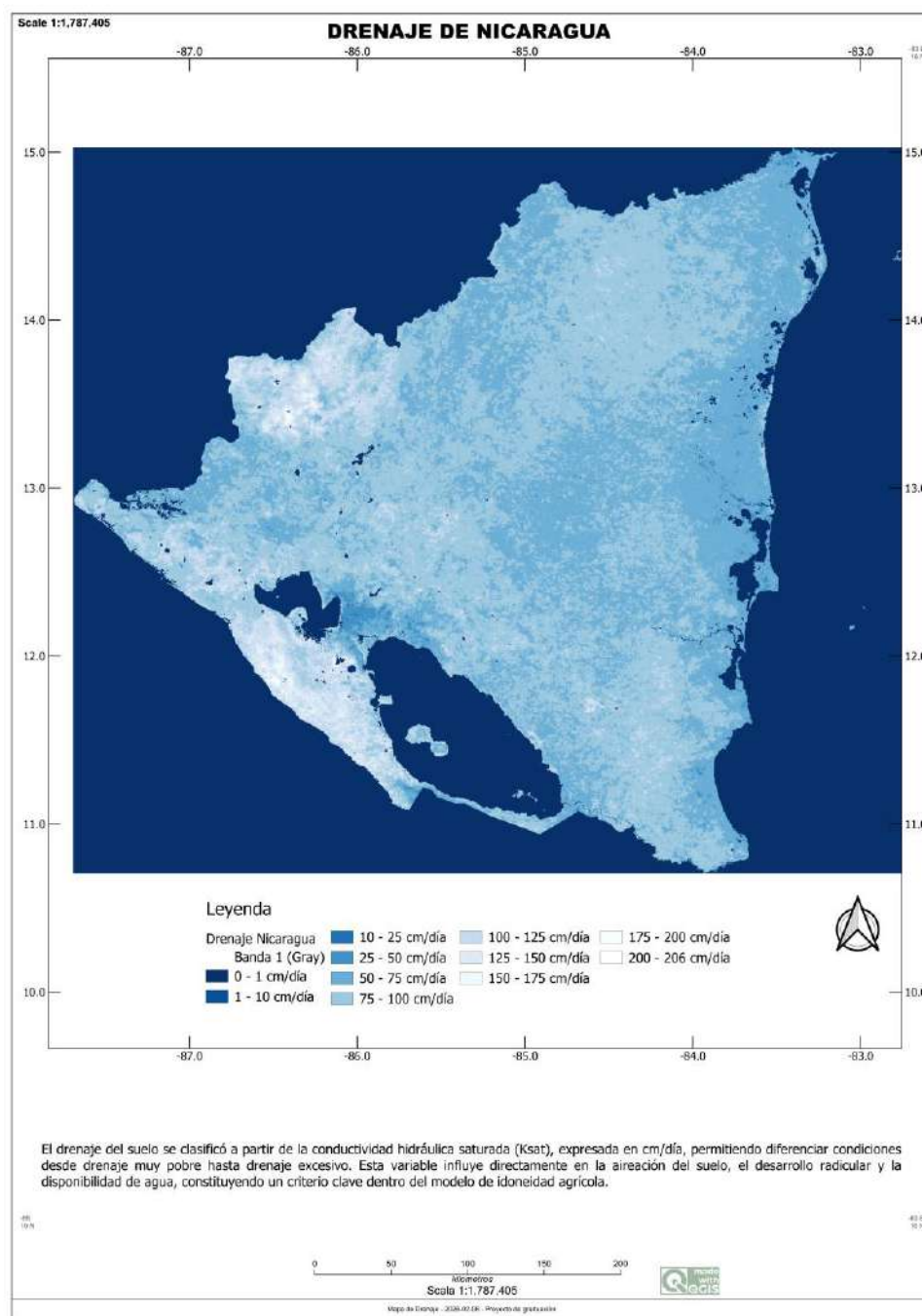
Precipitación – Diciembre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 50

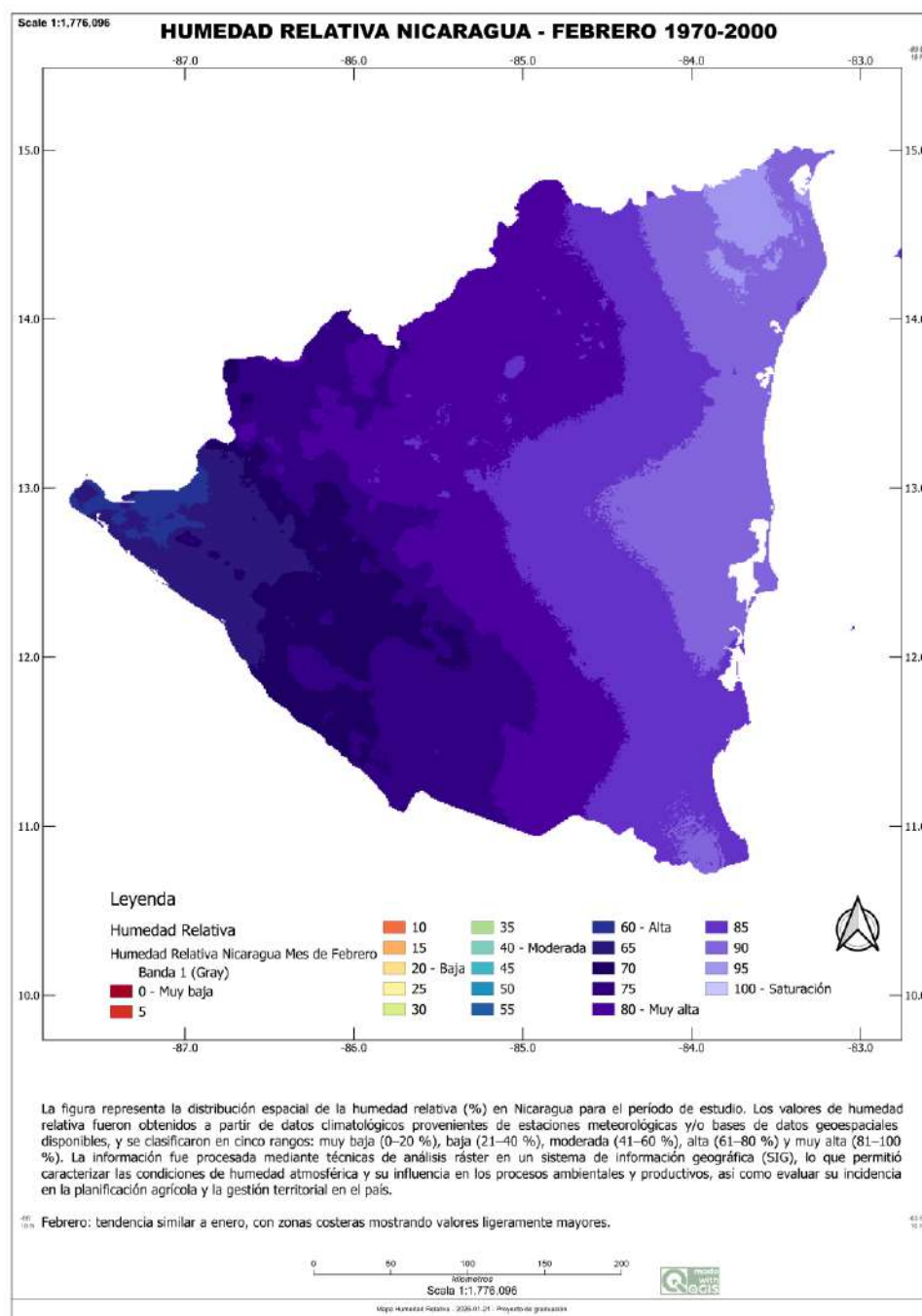
Capacidad de retención de agua



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 51

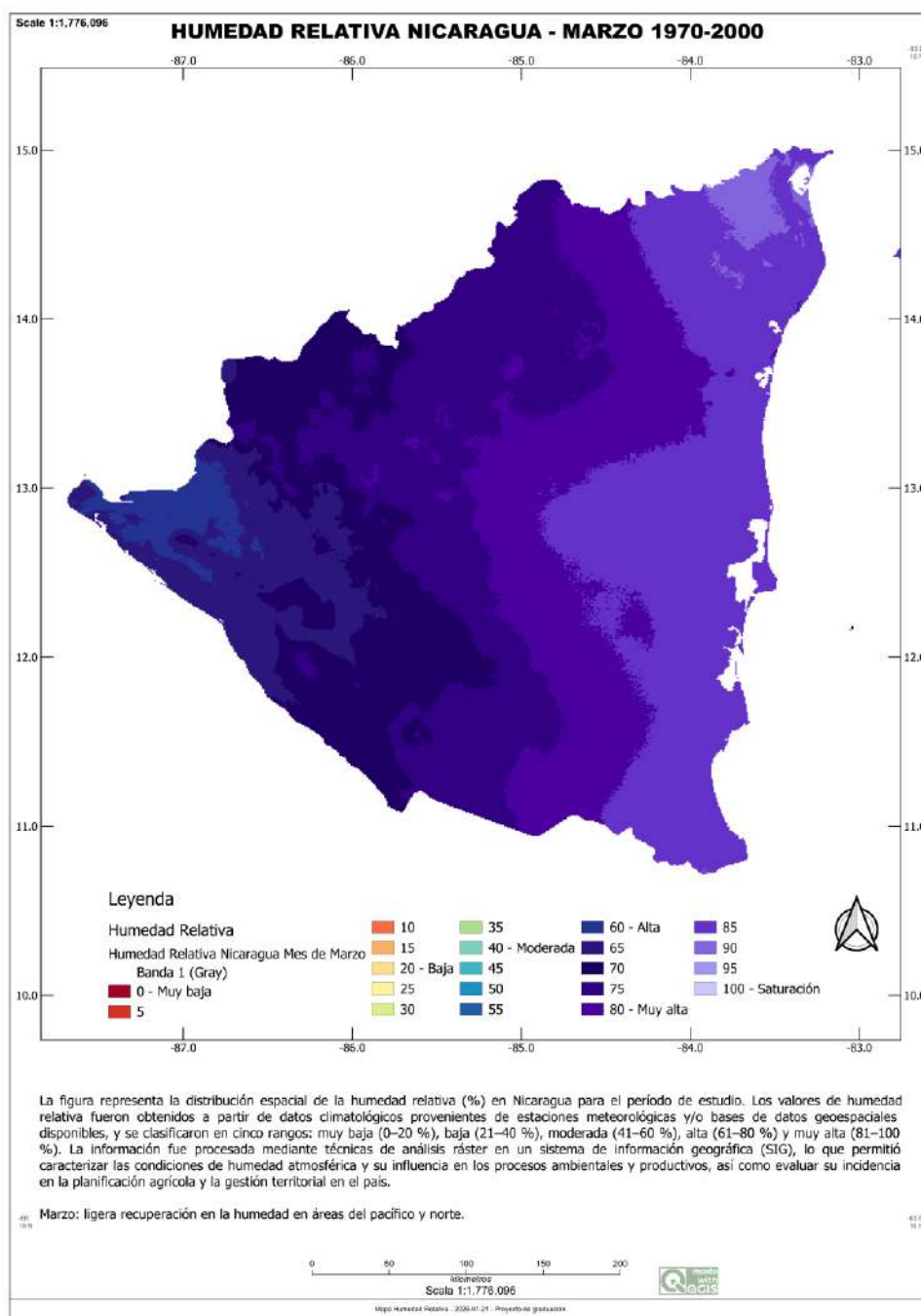
Mapa de Humedad Relativa – febrero



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 52

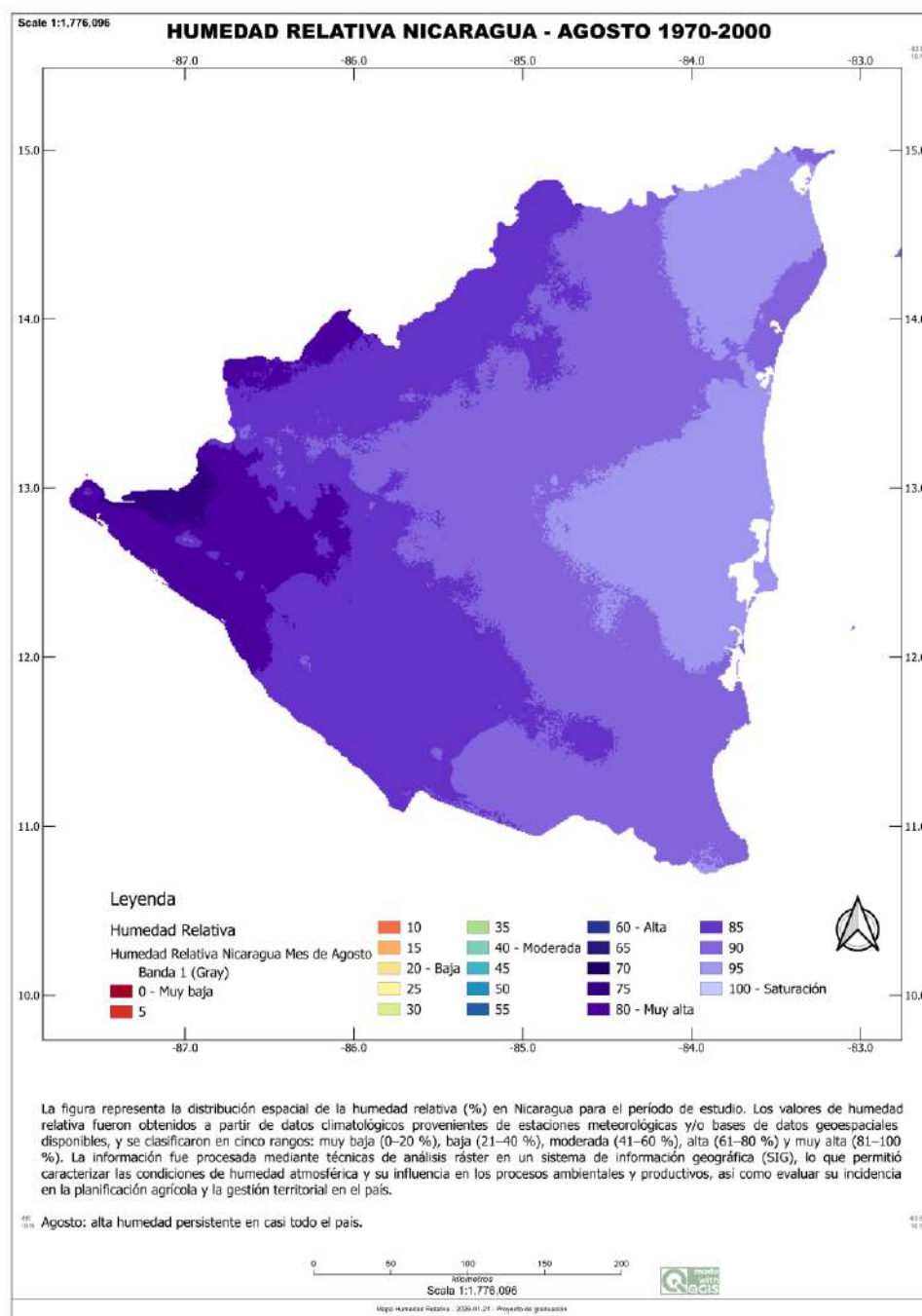
Mapa de Humedad Relativa – marzo



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 53

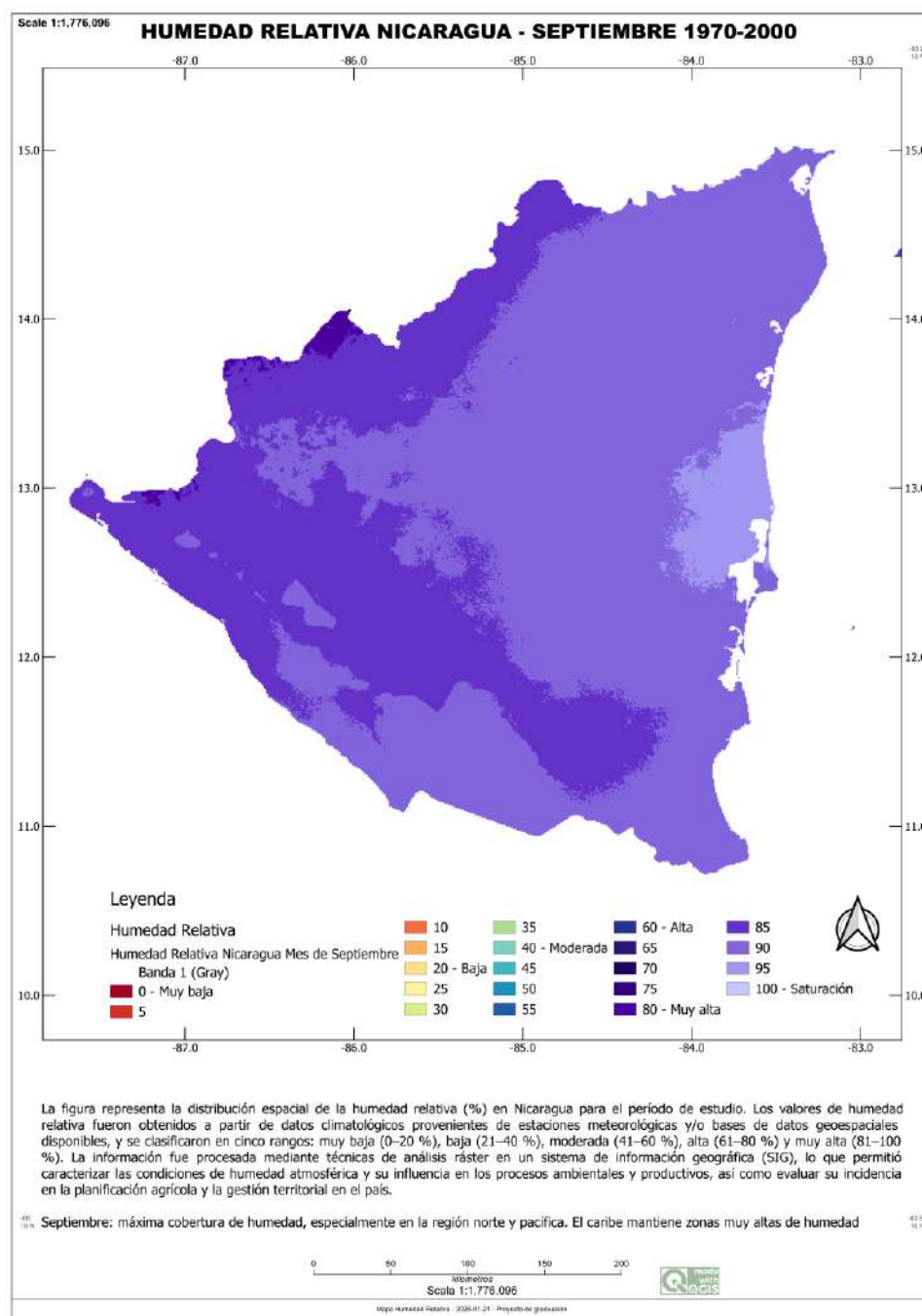
Mapa de Humedad Relativa – agosto



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 53

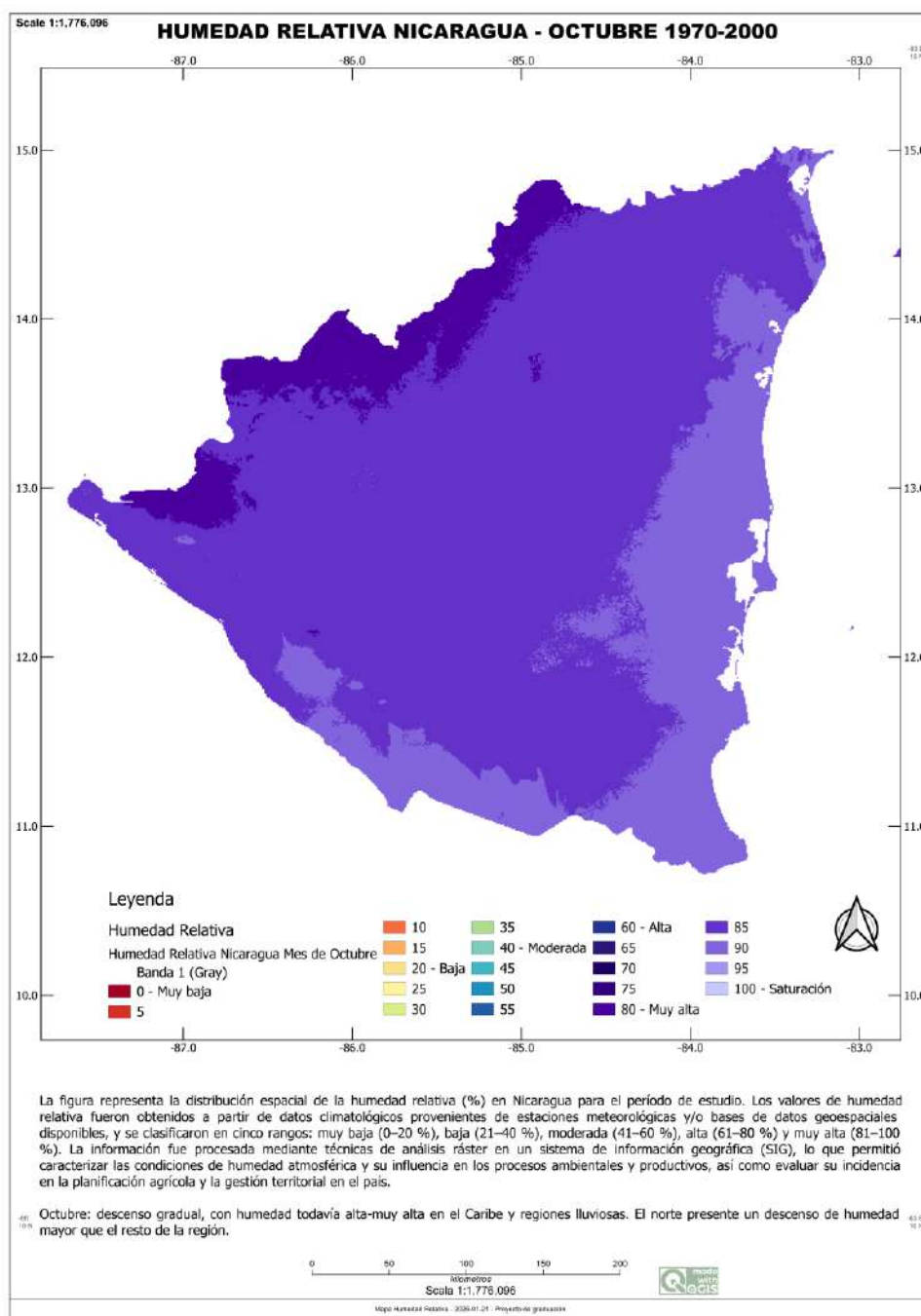
Mapa de Humedad Relativa – septiembre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 54

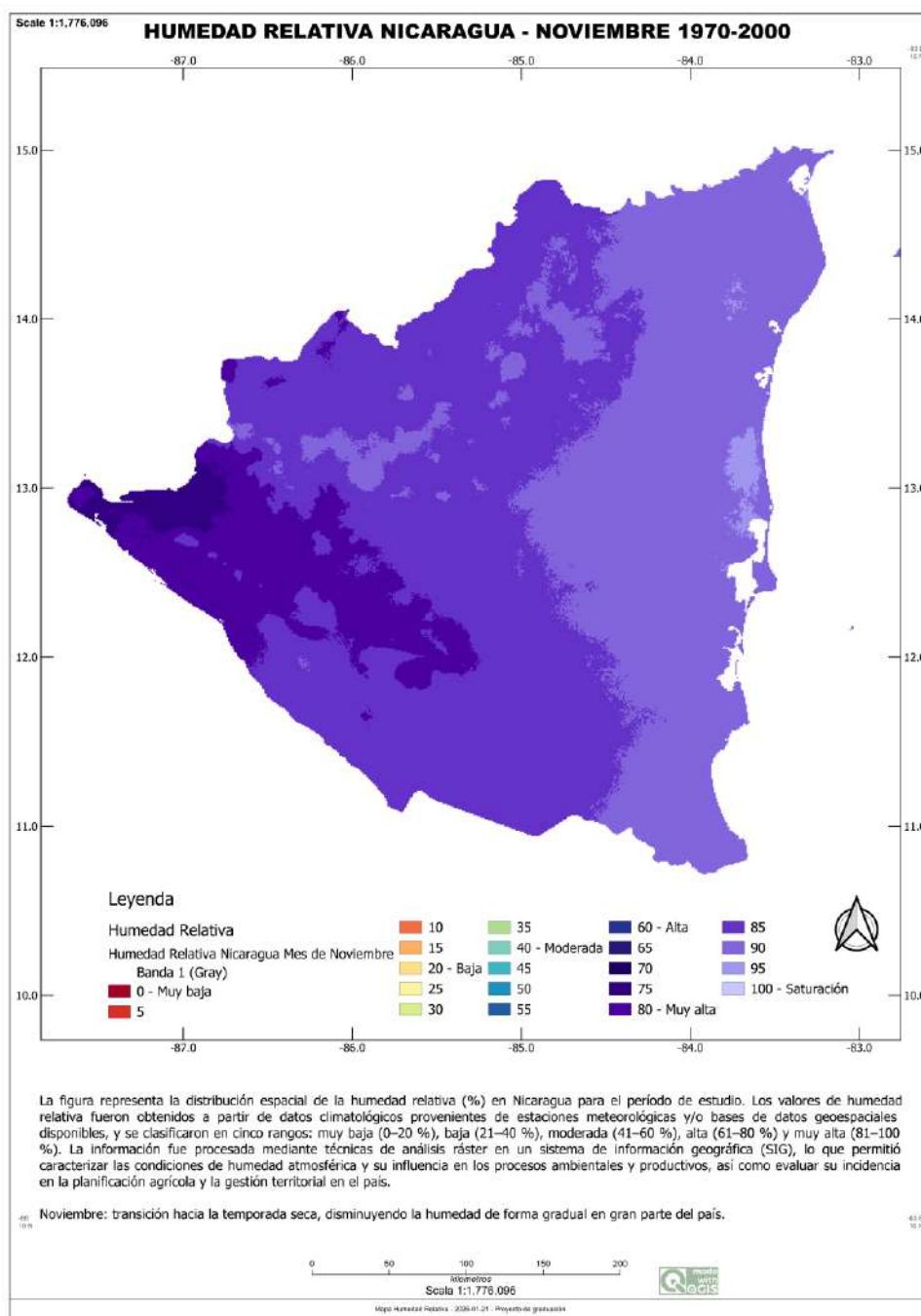
Mapa de Humedad Relativa – octubre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 55

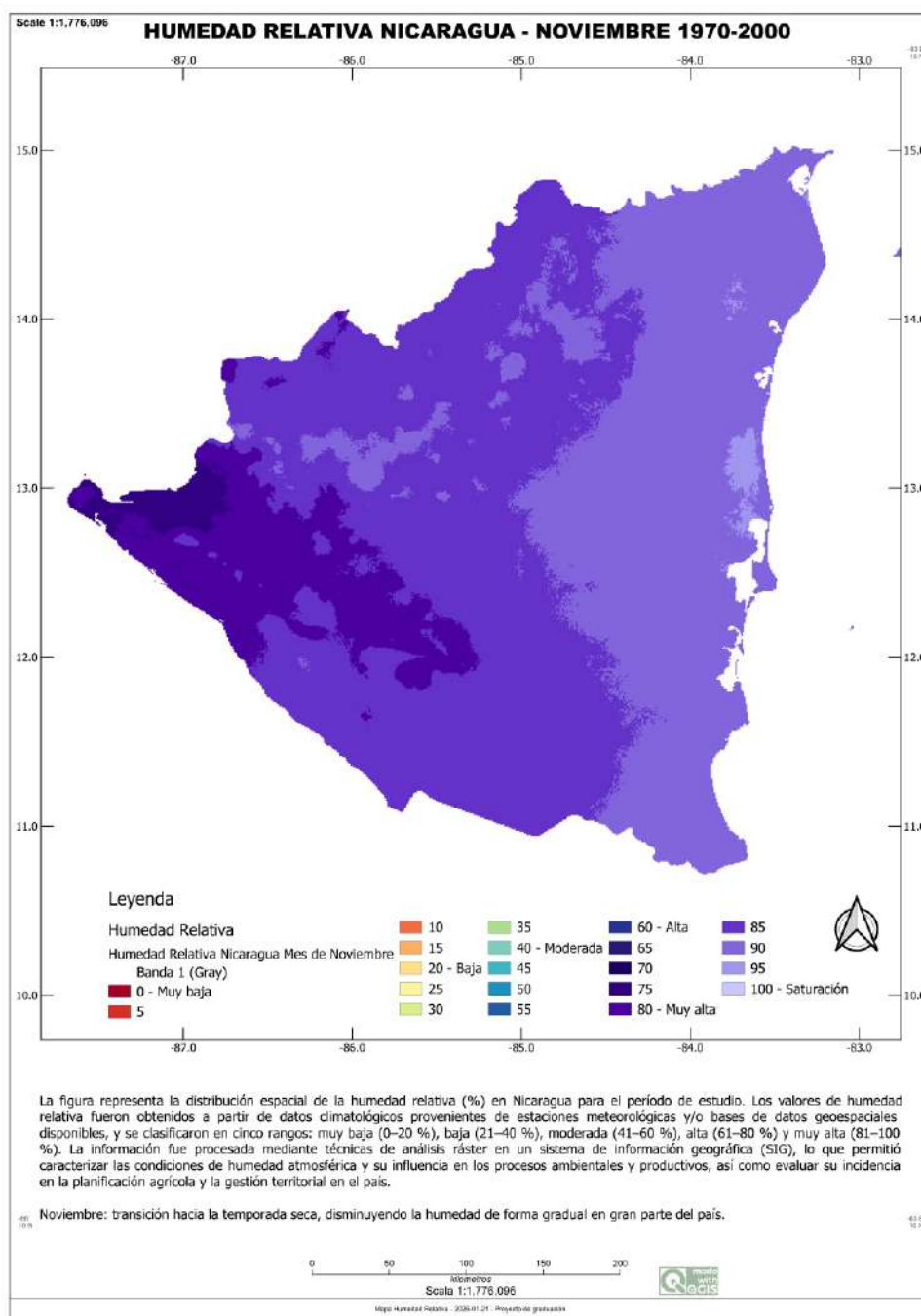
Mapa de Humedad Relativa – noviembre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 56

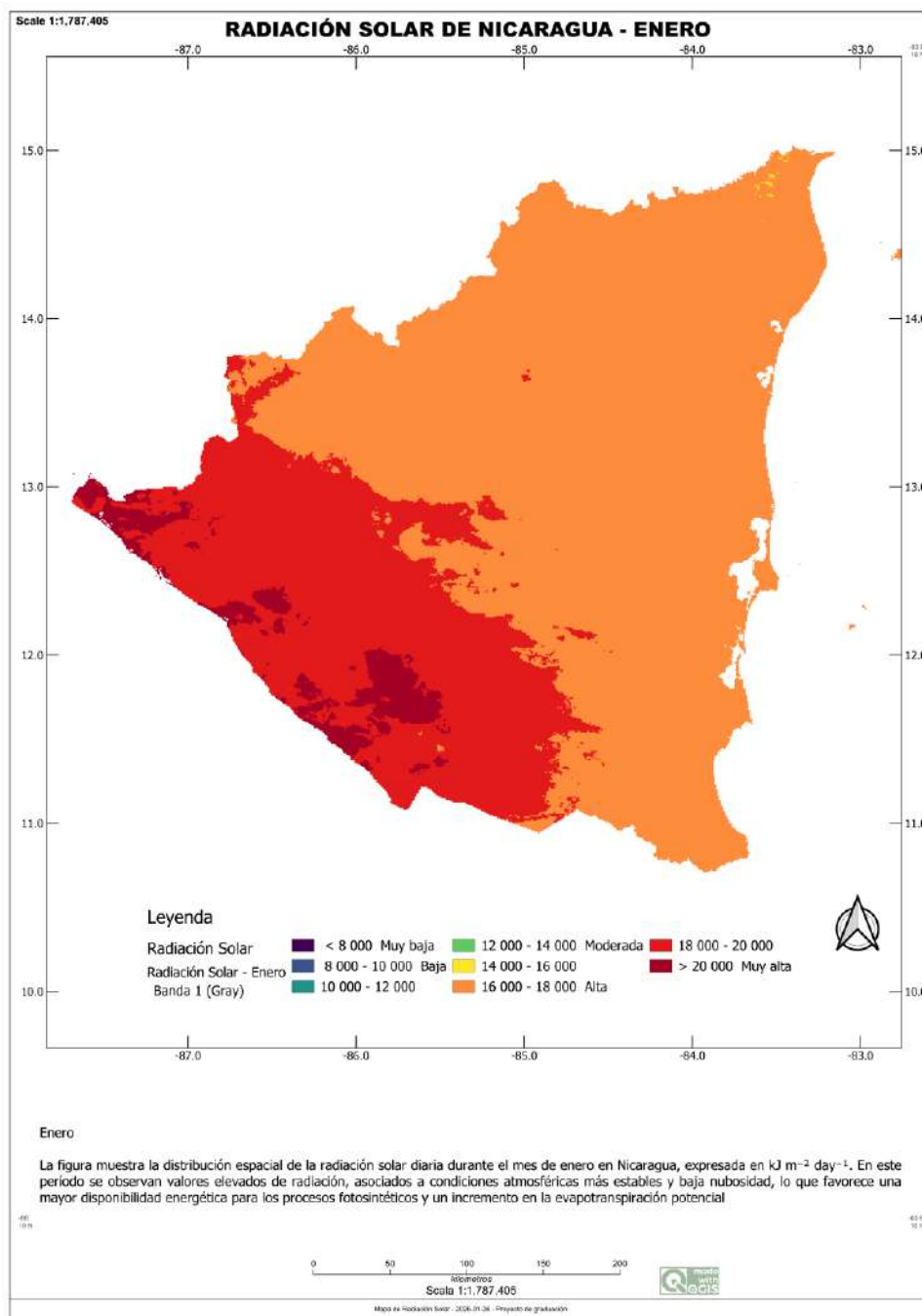
Mapa de Humedad Relativa – diciembre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 57

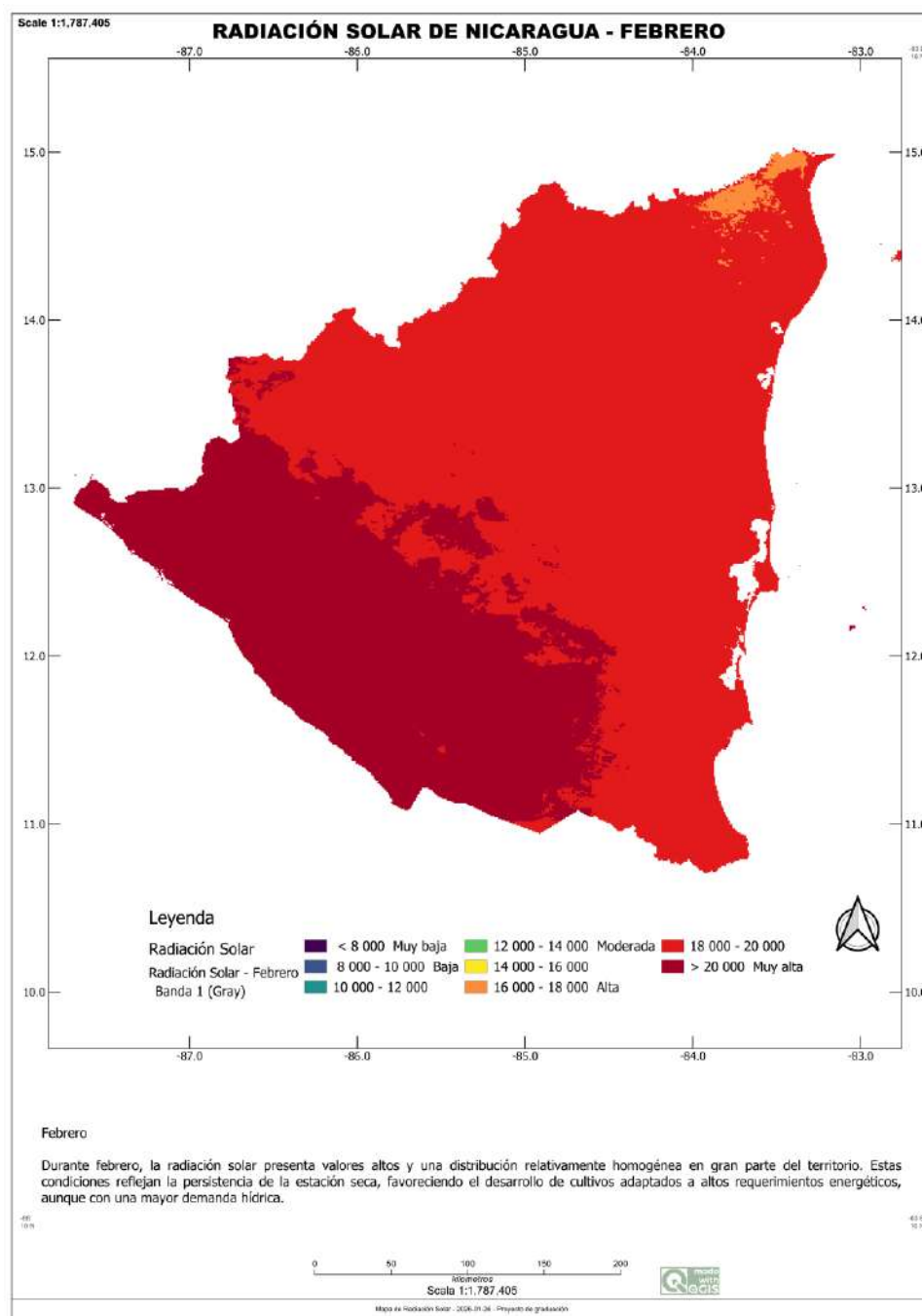
Mapa de Radiación Solar – enero



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 58

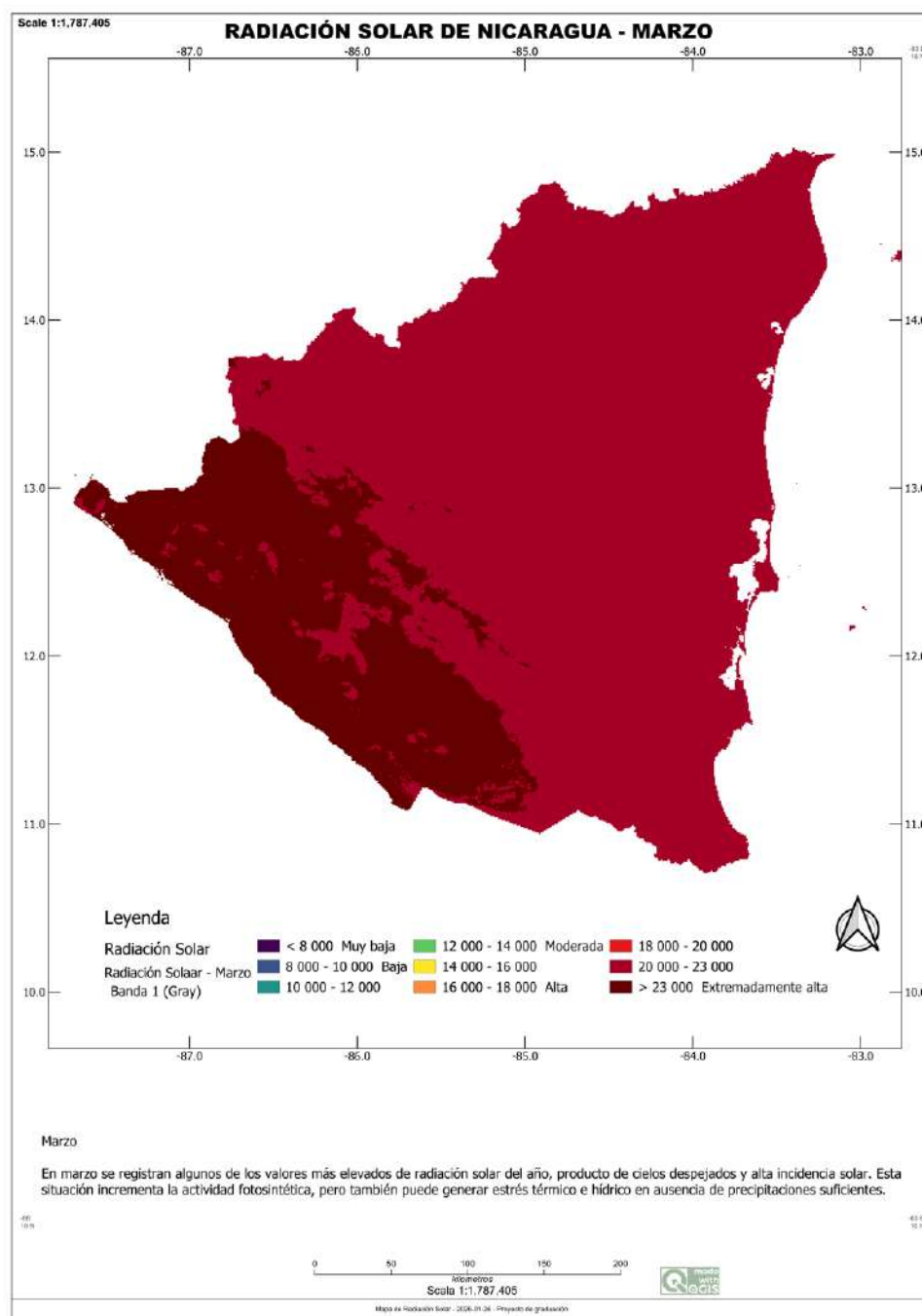
Mapa de Radiación Solar – febrero



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 59

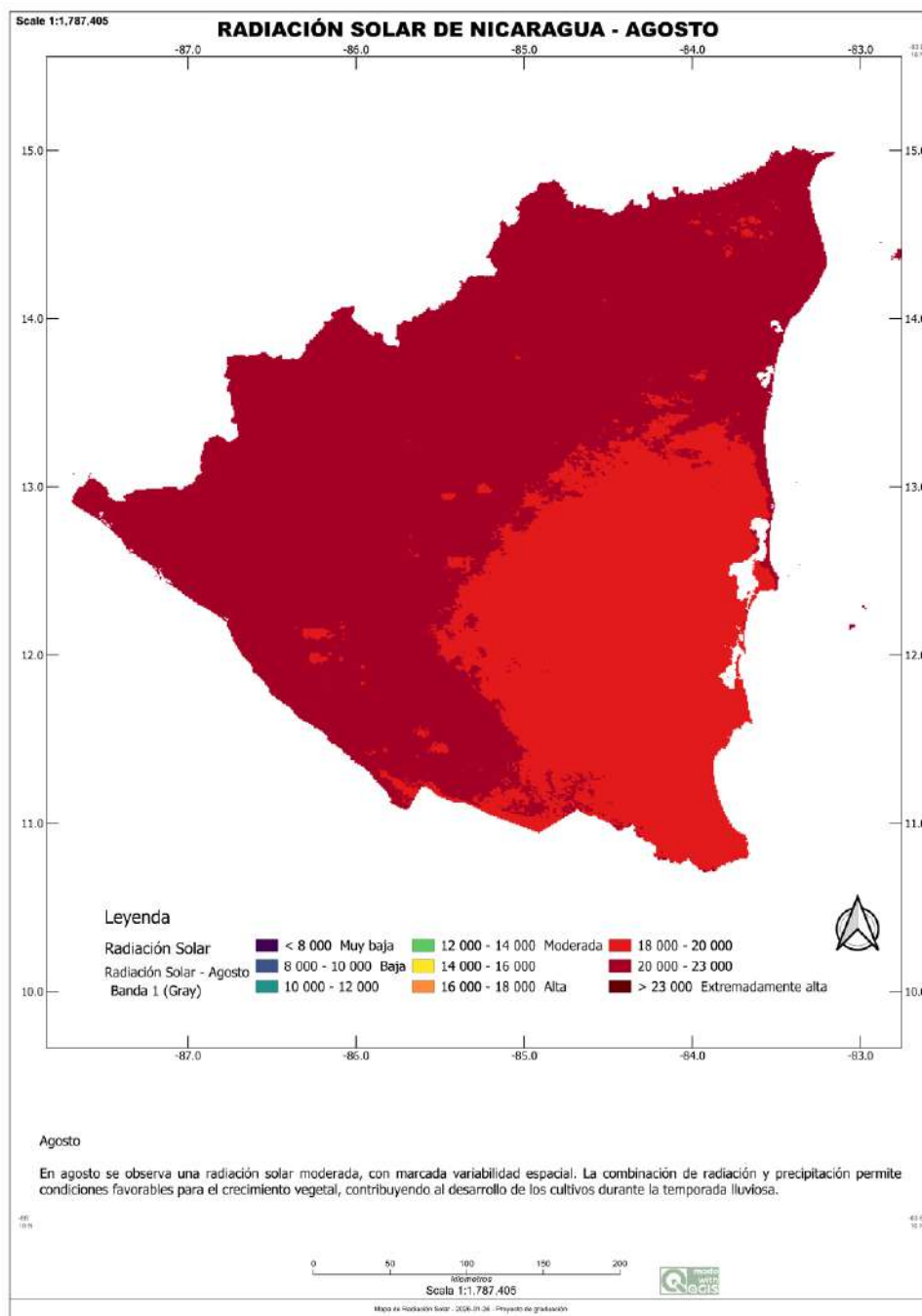
Mapa de Radiación Solar – marzo



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 60

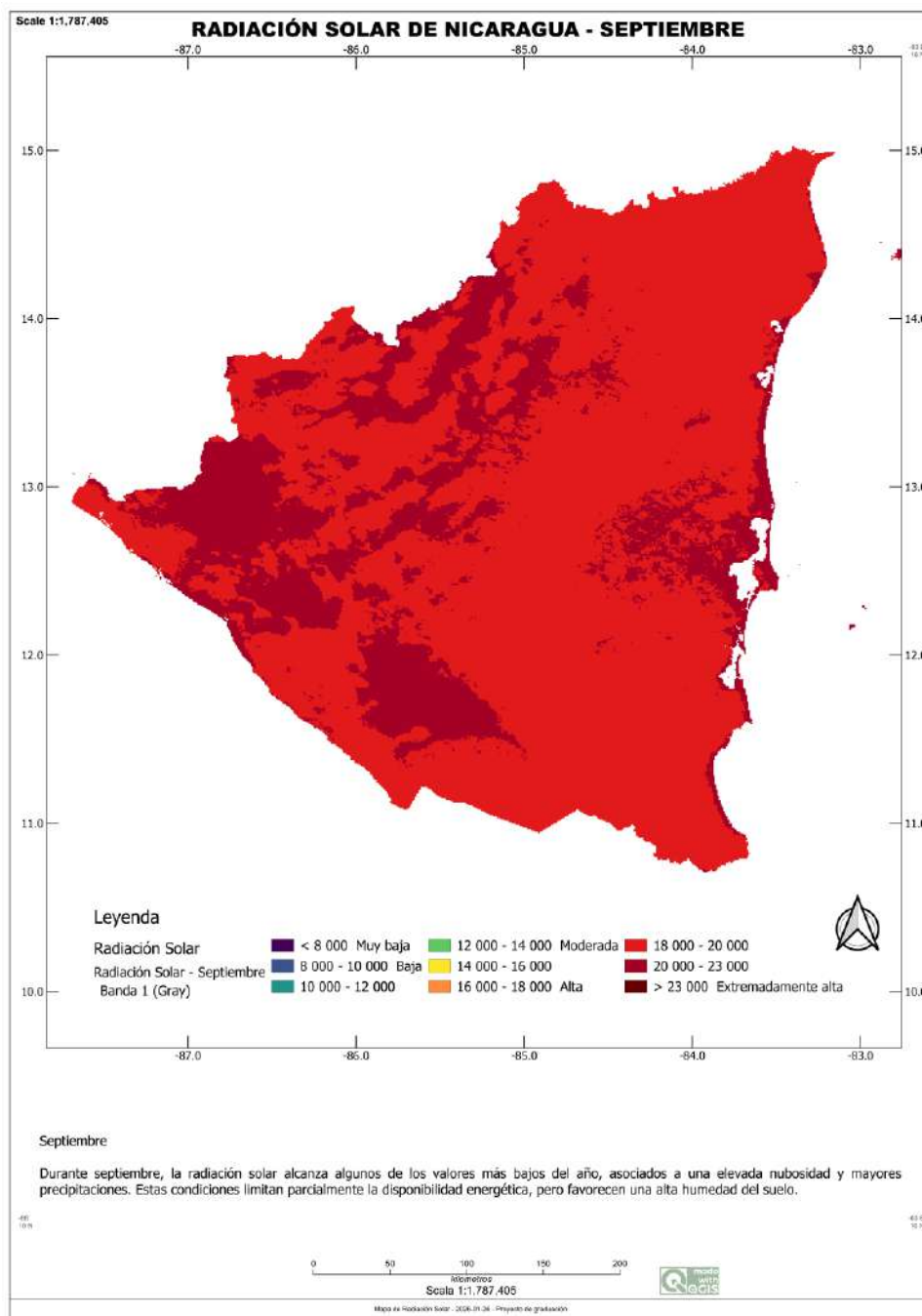
Mapa de Radiación Solar – agosto



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 61

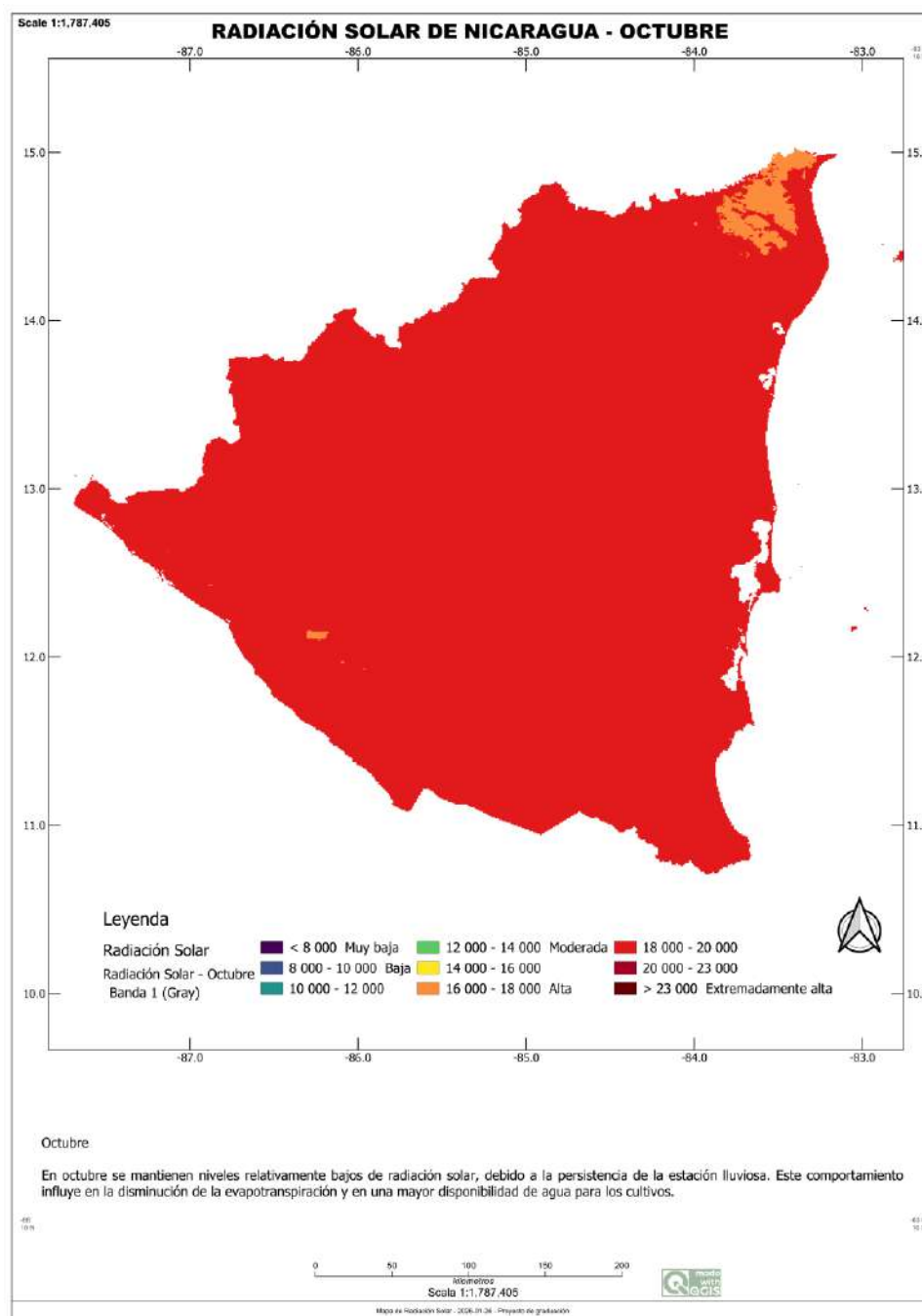
Mapa de Radiación Solar – septiembre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 62

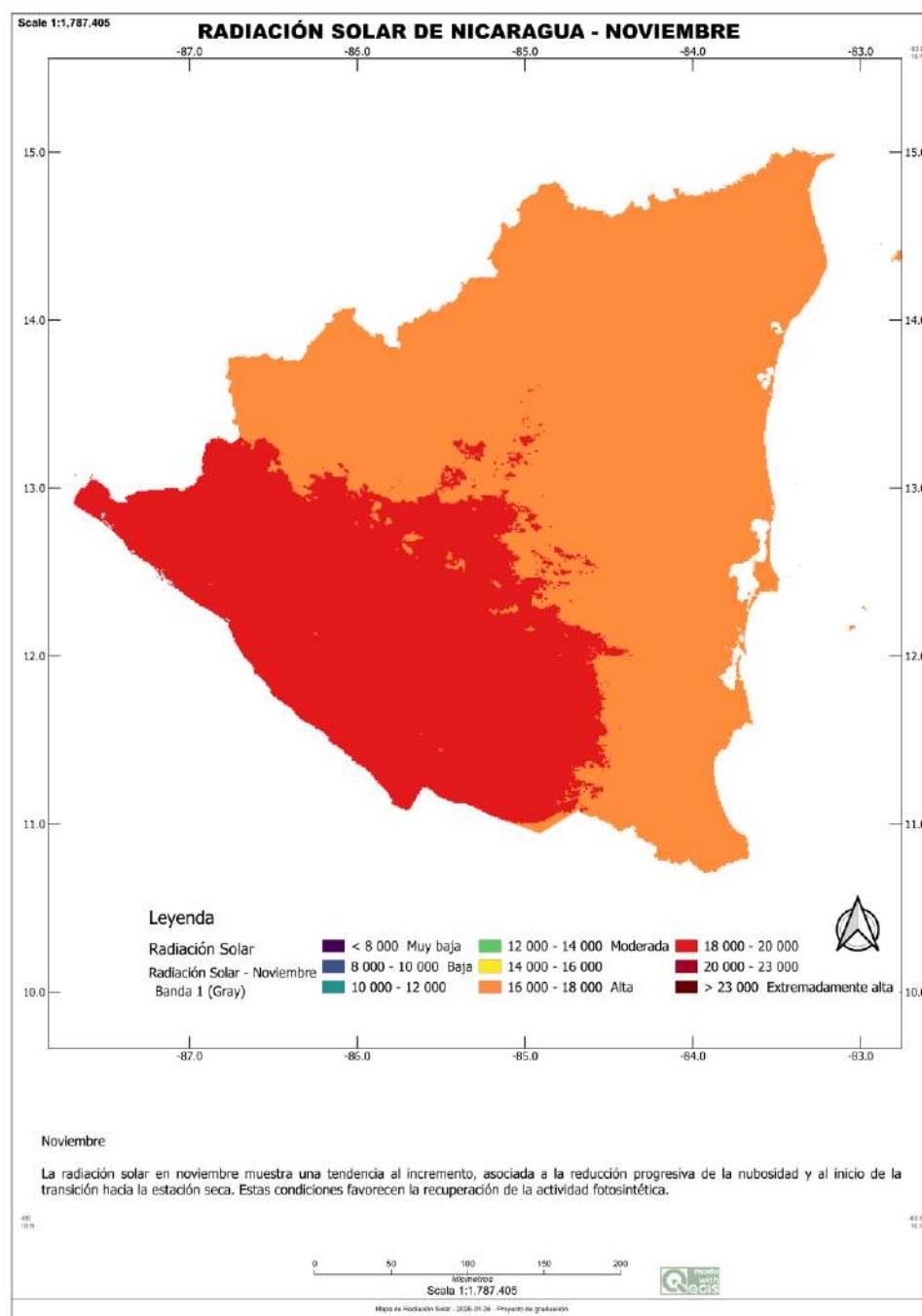
Mapa de Radiación Solar – octubre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 63

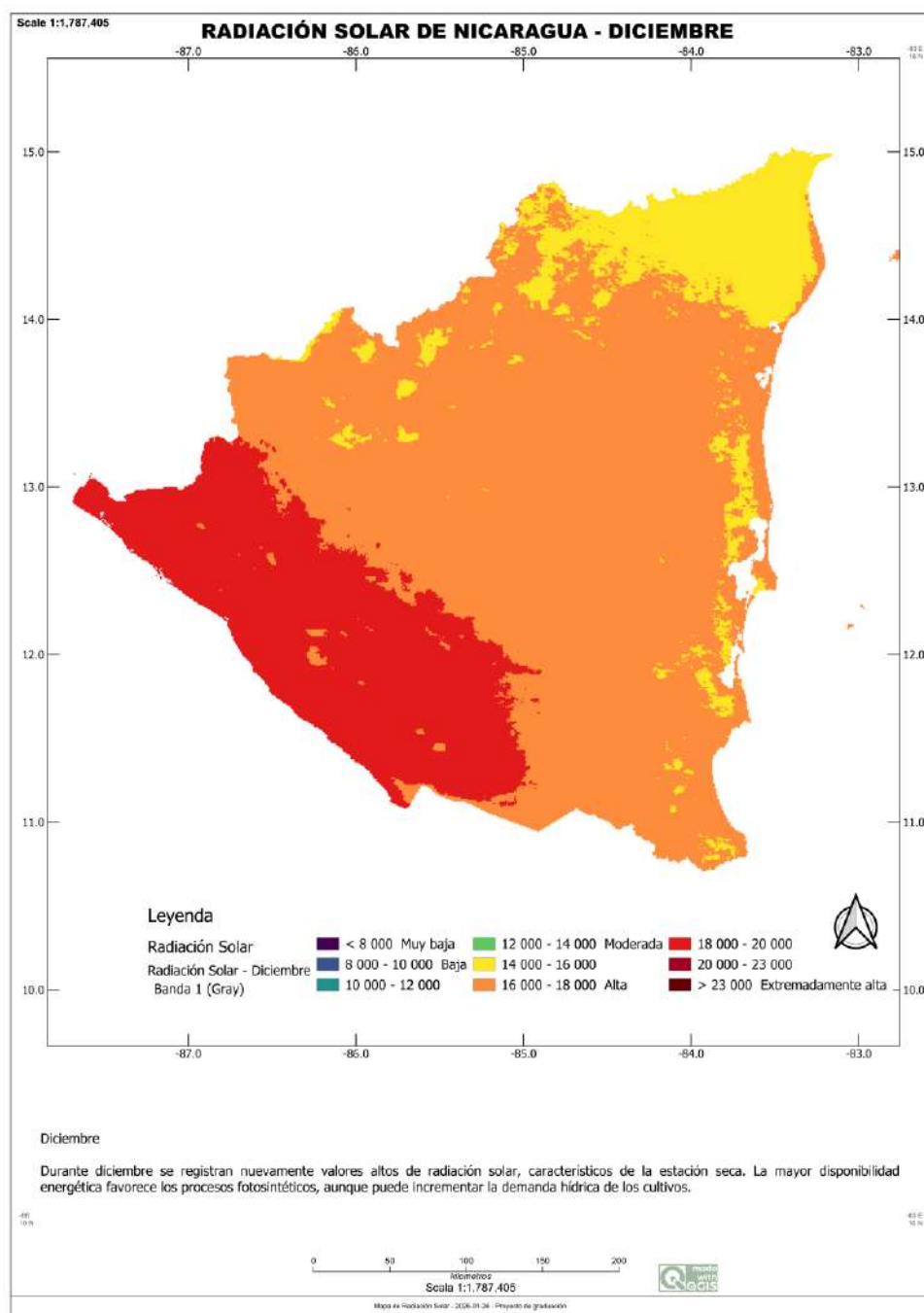
Mapa de Radiación Solar – noviembre



Nota: Generado con Software QGIS.

Figura 64

Mapa de Radiación Solar – Diciembre



Nota: Generado con Software QGIS.

Anexo 5

Código De entrenamiento Random Forest Regressor y Elastic Net.

```
import pandas as pd
import numpy as np

from sklearn.model_selection import KFold,
cross_val_predict
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.linear_model import ElasticNet
from sklearn.inspection import permutation_importance
from sklearn.preprocessing import RobustScaler
from sklearn.impute import SimpleImputer

# =====
# 1. CARGA DE DATOS
# =====
df = pd.read_csv("./rendimientos/Maiz NB-6.csv",
encoding="latin1")

features = [ "pendiente_avgmean",
            "hr_avgmean",
            "pre_accmean",
            "temp_avgmean",
            "pH suelos_mean",
            "rand_avgmean",
            "materia organica_mean",
            "profundidad_mean",
            "drenaje_mean",
            "elemean",
            "textura_emc",
            "crh_emc"
]

target = "Rendimiento"
```

```

X = df[features]
y = df[target]

# =====
# 2. PREPROCESAMIENTO
# =====
imputer = SimpleImputer(strategy="median")
scaler = RobustScaler()

X = imputer.fit_transform(X)
X = scaler.fit_transform(X)

X = pd.DataFrame(X, columns=features)

kf = KFold(n_splits=5, shuffle=True, random_state=42)

# =====
# 3. MODELOS
# =====

rf = RandomForestRegressor(
    n_estimators=300,
    max_depth=5,
    random_state=42
)

enet = ElasticNet(alpha=0.1, l1_ratio=0.5,
max_iter=5000)

# =====
# 4. CROSS VALIDATION PREDICTIONS
# =====

y_pred_rf = cross_val_predict(rf, X, y, cv=kf)
y_pred_enet = cross_val_predict(enet, X, y, cv=kf)

```

```

# =====
# 5. MÉTRICAS
# =====

def metrics(y_true, y_pred, name):
    r2 = r2_score(y_true, y_pred)
    rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_true, y_pred))
    print(f"\n--- {name} ---")
    print("R2:", round(r2, 3))
    print("RMSE:", round(rmse, 3))
    return r2, rmse

r2_rf, rmse_rf = metrics(y, y_pred_rf, "Random Forest")
r2_enet, rmse_enet = metrics(y, y_pred_enet, "Elastic
Net")

# =====
# 6. IMPORTANCIA RANDOM FOREST
# =====
rf.fit(X, y)
rf_importance = rf.feature_importances_

# =====
# 7. ELASTIC NET COEFICIENTES
# =====
enet.fit(X, y)
enet_coef = enet.coef_

# =====
# 8. PERMUTATION IMPORTANCE
# =====
perm = permutation_importance(rf, X, y, n_repeats=30,
random_state=42)
perm_importance = perm.importances_mean

```

```

# =====
# 9. TABLA FINAL NORMALIZADA
# =====

df_weights = pd.DataFrame({
    "Variable": features,
    "RF": rf_importance,
    "ElasticNet": np.abs(enet_coef),
    "Permutation": perm_importance
})

# normalizar cada columna
df_weights.iloc[:, 1:] = df_weights.iloc[:, 1:].apply(
    lambda x: x / x.sum(), axis=0
)

# promedio final
df_weights["Peso_Final"] = df_weights[["RF",
    "ElasticNet", "Permutation"]].mean(axis=1)

df_weights = df_weights.sort_values("Peso_Final",
    ascending=False)

print("\n--- PESO FINAL DE VARIABLES ---")
print(df_weights)

# =====
# 10. NORMALIZAR A 0-1
# =====

df_weights["Peso_Normalizado"] =
df_weights["Peso_Final"] /
df_weights["Peso_Final"].sum()

print("\n--- PESO NORMALIZADO (0-1) ---")
print(df_weights[["Variable", "Peso_Normalizado"]])

```

```

# =====
# 6. Gráfica de Real vs Predicho
# =====

plt.figure(figsize=(10, 6))

sns.scatterplot(x=y, y=y_pred_rf, alpha=0.7)

# Línea de identidad (perfecta predicción)
plt.plot([y.min(), y.max()], [y.min(), y.max()], 'r--',
lw=2)

plt.xlabel("Rendimiento Real")
plt.ylabel("Rendimiento Predicho")
plt.title(f"Real vs Predicho (R²: {r2_rf:.3f})")

plt.grid(True)

plt.show()

```

Anexo 6

Clasificación de variables edafoclimáticas según metodología FLE + EMC y su importancia relativa del Frijol INTA Rojo

Variables	Clase	Rango / Valor	Valor EMC	Importancia
pH del suelo	S_t	6.75	1.00	0.050010
	S_1	6.0 – 7.5	0.88	
	S_2	4.5 – 8.2	0.75	
	N	< 4.5 o > 8.2	0.00	
Materia orgánica (%)	S_1	≥ 1.5	1	0.097081
	S_2	1.0	0.75	
	N	< 1.0	0.00	
Pendiente (%)	S_1	0 – 8 %	1.00	0.110588
	S_2	8 – 15 %	0.75	
	N	> 15 %	0.00	
Profundidad efectiva (cm)	S_1	≥ 100	1.00	0.130902
	S_2	50 – 100	0.75	
	N	< 25	0.00	
	S_1	18 – 27	1.00	

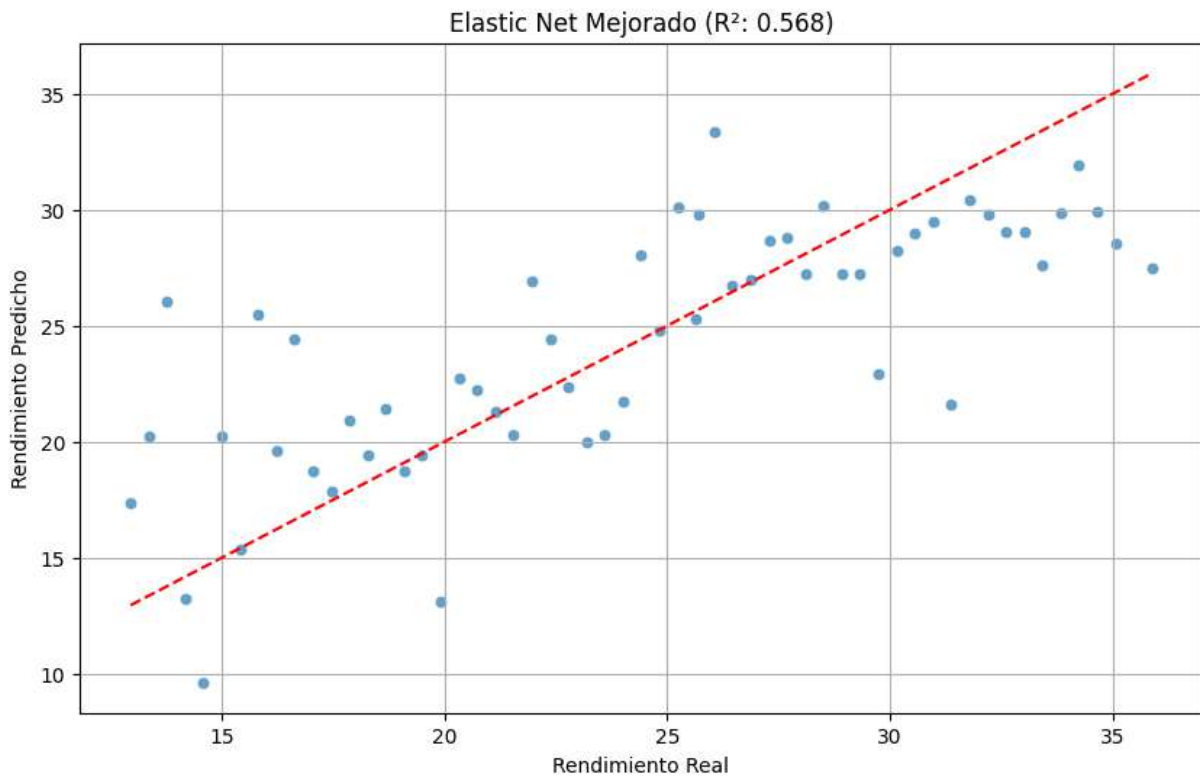
Temperatura media diaria (°C)	S_2	15 – 18	0.75	0.097081
	N	< 15 o > 30	0.00	
Precipitación por ciclo productivo total (mm)	S_1	1000 – 1600	1	0.068274
	S_2	500 – 1000	0.75	
	N	< 400 o > 1600	0.00	
Humedad relativa (%)	S_t	67.5	1	0.022620
	S_1	60 – 75	0.88	
	S_2	50 – 60 o 75 – 80	0.75	
	N	< 45 o > 80	0.00	
Elevación (m.s.n.m.)	S_t	425	1.00	0.150868
	S_1	50 – 800	0.88	
	S_2	800 – 1200	0.75	
	N	> 12000	0.00	
Capacidad de retención (CRH, mm/m)	S_1	Alta (150 mm/m)	1.00	0.00
	S_2	Media (100 - 150 mm/m)	0.75	
	N	Baja (<100mm/m)	0.00	

Drenaje (Cm/Día)	S_1	Óptimo (≥ 50 cm/día)	1.00	0.050254
	S_2	Moderado (50 - 10 cm/día)	0.75	
	N	Pobre (<10 cm/día)	0.00	
Textura del suelo	S_1	Franco, Franco limoso, Franco - arenoso	1.00	0.114866
	S_2	Franco arcilloso	0.75	
	N	Arenoso / muy arenoso / Arenoso franco / Limoso / Franco arcillo arenoso / Franco arcillo limoso/ Arcillo limoso / Arcilloso	0.00	
Radiación solar (KJ/m²/día)	S_t	Óptimo (20,100 kJ/m ² /día)	1.00	0.00
	S_1	Alta (18,200 - 22,000 kJ/m ² /día)	0.88	
	S_2	Moderada (15,000 – 18,000 kJ/m ² /día)	0.75	
	S_3	Baja (12,000-15,000 kJ/m ² /día)	0.25	

	N	Muy bajo (< 12,000 kJ/m ² /día)	0.00	
--	-----	--	------	--

Nota: Elaboración propia.

Rendimiento real vs predicho para el frijol INTA ROJO.



Nota: Elaboración propia.

Error cuadrático medio para el frijol INTA ROJO.

RMSE= 4.33

Coefficiente de determinación para el frijol INTA ROJO.

R^2 = 0.568

Anexo 7

Flujograma del Desarrollo del Modelo Inteligente

